



**Cátia Baltazar  
Alves**

**Avaliação da aplicação de argamassas de cal em  
suportes tradicionais**





**Cátia Baltazar  
Alves**

**Avaliação da aplicação de argamassas de cal em  
suportes tradicionais**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica da Doutora Ana Luísa Velosa, Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação científica da Doutora Slávka Andrejkovičová, Investigadora Auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.





*À minha família.*



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa**

professor catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues**

professora associada da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

**Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa**

professora associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro



## agradecimentos

Com este trabalho, chega ao fim mais uma etapa da minha vida. E foram muitas as pessoas que de forma direta ou indireta contribuíram para a sua concretização, às quais quero deixar o meu agradecimento.

Obrigada à professora Ana Velosa, orientadora desta dissertação, pela partilha de conhecimento, pelas críticas e sugestões prestadas ao longo deste trabalho.

À Slávka, co-orientadora desta dissertação, por toda a dedicação, incentivo, simpatia, paciência, por estar sempre disponível para me ajudar e também por todos os esclarecimentos e sugestões.

*Bolo mi potešením s vami pracovať! Ďakujem!*

Ao pessoal do laboratório, por toda a camaradagem e amizade, um agradecimento especial à engenheira Maria Carlos e ao sr. Vitor Rodrigues pela enorme paciência e apoio prestado na preparação e realização dos ensaios.

Aos meus colegas de curso e amigos, em especial ao Daniel, à Nani, à Diana, à Cátia, ao Pisco, ao Nuno e ao Ricardo, cujo apoio, carinho e dedicação foram a base de motivação para que chegasse ao fim. Também ao Luís e ao Manel, que apesar de indiretamente, sempre me apoiaram para que pudesse chegar até aqui.

Às minhas amigas de sempre, a Maria e a Andreia, por fazerem parte da minha vida, porque mesmo longe fazem-se sentir tão perto. Pela grande amizade, por todas as palavras de incentivo e apoio incondicional.

A toda a minha família, primos, tios, avós, em especial aos meus pais por todo o amor, sacrifício, incentivo, compreensão, por todas as palavras de conforto e por sempre acreditarem em mim.



**palavras-chave**

Cal, metacaulino, bentonite, argamassa, adobe.

**resumo**

A presente dissertação, enquadrada no projeto METACAL, permitiu o estudo do comportamento de diferentes composições de argamassas de cal em suportes de adobe.

Para tal, estas foram sujeitas a vários tipos de ensaio, mecânicos e químicos, procurando adaptá-las a situações reais, com o intuito de perceber qual a melhor composição de argamassa que se adequa a este tipo de suporte.

Como não é possível encontrar um tipo de argamassa ideal, que se adapte a todas as situações, tem este trabalho como base, estudar os parâmetros que influenciam a sua escolha.





**keywords**

Lime, metakaolin, bentonite, adobe.

**abstract**

This dissertation, framed in METACAL project, allowed the study of the behaviour of different compositions of lime mortars in adobe.

For this, they were subject to various kinds of chemical and mechanical tests seeking to adapt them to actual situations, in order to realize which mortar composition is more suitable for this type of support.

As it is not possible to find a type of mortar ideal that suits all situations, this work has as a basis to study the parameters that influence your choice.



## ÍNDICE GERAL

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Organização .....	2
<b>2 USO DE ARGAMASSAS DE CAL NA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS ANTIGOS.....</b>	<b>5</b>
2.1 Definições Gerais.....	5
2.2 Propriedades das Argamassas de Cal.....	6
2.3 Ligantes.....	6
2.3.1 Cal .....	6
2.3.2 Pozolanas.....	7
2.3.2.1 Metacaulino.....	8
2.3.2.2 Bentonite .....	8
<b>3 CONSTRUÇÃO EM ADOBE .....</b>	<b>13</b>
3.1 Considerações Gerais.....	13
3.2 Patologias em Edifícios Construídos com Adobe.....	14
<b>4 ENSAIOS.....</b>	<b>19</b>
4.1 Considerações Gerais.....	19
4.2 Ensaio de Permeabilidade à Água Sob Baixa Pressão .....	19
4.3 Determinação do Teor em Água por Gravimetria .....	19
4.4 Avaliação da Carbonatação.....	19
4.5 Absorção de Água por Capilaridade .....	20
4.6 Avaliação da Compacidade Utilizando o PUNDIT .....	21
4.7 Ensaio de Aderência (Pull-Off) .....	22

<b>5</b>	<b>TRABALHO LABORATORIAL .....</b>	<b>25</b>
5.1	Trabalho a Realizar .....	25
5.1.1	Considerações Gerais .....	25
5.1.2	Etapas do Trabalho .....	26
5.2	Trabalho Experimental.....	28
5.2.1	Considerações Gerais .....	28
5.2.2	Materiais.....	28
5.2.3	Preparação das Argamassas .....	29
5.2.3.1	Provetes .....	29
5.2.3.1.1	Ensaio realizado aos provetes .....	32
5.2.3.1.1.1	Módulo de elasticidade .....	32
5.2.3.1.1.2	Resistência à flexão .....	32
5.2.3.1.1.3	Resistência à compressão.....	33
5.2.3.1.1.4	Carbonatação .....	34
5.2.3.1.1.5	Absorção de água por capilaridade.....	34
5.2.3.1.1.6	Resistência aos sais.....	35
5.2.3.1.1.7	Análise mineralógica (DRX) .....	36
5.2.3.1.1.8	SEM - “Scanning Electron Microscope” .....	37
5.2.3.2	Blocos de adobe .....	38
5.2.3.2.1	Ensaio realizado às argamassas em blocos de adobe.....	38
5.2.3.2.1.1	Aderência (Pull-off).....	38
5.2.3.2.1.2	Carbonatação .....	39
5.2.3.2.1.3	Absorção de água sob baixa pressão.....	40
5.2.3.2.1.4	Envelhecimento artificial acelerado.....	40
5.2.3.3	Parede de Adobe.....	41
5.2.3.3.1	Ensaio realizado na parede de adobe .....	42
5.2.3.3.1.1	Pull-off.....	42
5.2.3.3.1.2	Carbonatação .....	42
5.2.3.3.1.3	Absorção de água sob baixa pressão.....	43
5.2.3.3.1.4	PUNDIT .....	43
<b>6</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
6.1	Considerações Gerais.....	47

6.2	Massa Volúmica Aparente .....	47
6.3	Análise Química e Mineralógica .....	48
6.3.1	Materiais .....	48
6.3.2	Argamassas .....	50
6.3.2.1	Argamassas ao traço volumétrico 1:3 .....	50
6.3.2.2	Argamassas ao traço volumétrico 1:2 .....	53
6.3.2.3	Argamassas com areia de rio ao traço volumétrico 1:2 .....	55
6.3.2.4	Argamassas sujeitas ao efeito de sais .....	57
6.4	Análise Através do Microscópio Eletrónico de Varrimento (SEM) .....	60
6.4.1	Argamassas ao Traço Volumétrico 1:3 .....	60
6.4.2	Argamassas ao Traço Volumétrico 1:3 Sujeitas ao Efeito de Sais .....	62
6.5	Análise das Propriedades Mecânicas dos Provets de Argamassa .....	64
6.5.1	Considerações Gerais .....	64
6.5.2	Resistência à Flexão .....	64
6.5.2.1	Argamassas ao traço volumétrico 1:3 .....	65
6.5.2.2	Argamassas ao traço volumétrico 1:2 .....	66
6.5.2.3	Argamassas com areia de rio ao traço 1:2 .....	67
6.5.2.4	Argamassas com traço volumétrico 1:3 sujeitas ao efeito de sais .....	68
6.5.3	Resistência à Compressão .....	68
6.5.3.1	Argamassas ao traço volumétrico 1:3 .....	69
6.5.3.2	Argamassas ao traço volumétrico 1:2 .....	70
6.5.3.3	Argamassas com areia de rio ao traço 1:2 .....	71
6.5.3.4	Argamassas com traço volumétrico 1:3 sujeitas ao efeito de sais .....	72
6.5.4	Módulo de Elasticidade .....	72
6.5.4.1	Argamassas ao traço volumétrico 1:3 .....	73
6.5.4.2	Argamassas ao traço volumétrico 1:2 .....	74
6.5.4.3	Argamassas com areia de rio ao traço 1:2 .....	75
6.5.5	Considerações Finais .....	75
6.6	Avaliação da Carbonatação .....	76
6.6.1	Considerações Gerais .....	76
6.6.2	Provets de Argamassa .....	77
6.6.2.1	Argamassas ao traço volumétrico 1:3 .....	77
6.6.2.2	Argamassas ao traço volumétrico 1:2 .....	78

6.6.2.3	Argamassas com areia de rio ao traço 1:2 .....	79
6.6.3	Blocos de Adobe .....	80
6.6.3.1	Argamassas ao traço volumétrico 1:3 .....	80
6.6.4	Parede de Adobe.....	81
6.6.4.1	Argamassas ao traço volumétrico 1:3 .....	81
6.6.4.2	Argamassas ao traço volumétrico 1:2 .....	82
6.7	Absorção de Água por Capilaridade .....	83
6.7.1	Considerações Gerais .....	83
6.7.2	Provetes de Argamassa.....	83
6.7.2.1	Argamassas ao traço volumétrico 1:3 .....	83
6.7.2.2	Argamassas ao traço volumétrico 1:2 .....	85
6.7.2.3	Argamassas com areia de rio ao traço 1:2.....	87
6.8	Absorção de Água Sob Pressão .....	89
6.8.1	Blocos de Adobe .....	89
6.8.2	Parede de Adobe.....	92
6.8.2.1	Argamassas ao traço volumétrico 1:3 .....	92
6.8.2.2	Argamassas ao traço volumétrico 1:2 .....	93
6.9	Ensaio de Aderência (Pull-Off) .....	93
6.9.1	Considerações Gerais .....	93
6.9.2	Blocos de Adobe .....	94
6.9.2.1	Argamassas ao traço volumétrico 1:3 .....	94
6.9.3	Parede de Adobe.....	97
6.9.3.1	Argamassas ao traço volumétrico 1:3 .....	97
6.9.3.2	Argamassas ao traço volumétrico 1:2 .....	98
6.10	Avaliação da Compacidade Utilizando o PUNDIT .....	99
6.10.1	Considerações Gerais .....	99
6.10.2	Argamassas ao Traço Volumétrico 1:3 .....	99
6.10.3	Argamassas ao Traço Volumétrico 1:2 .....	100
6.11	Envelhecimento Artificial Acelerado .....	101
6.11.1	Considerações Gerais .....	101
6.11.2	Argamassas ao Traço Volumétrico 1:3 .....	101
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>

<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>109</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>115</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2

Figura 2.1 - O ciclo da cal [6].....	7
--------------------------------------	---

### Capítulo 3

Figura 3.1 - Casas em adobe [15].....	13
---------------------------------------	----

### Capítulo 4

Figura 4.1 - Teste à fenolftaleína.....	20
Figura 4.2 - Ensaio de capilaridade.....	21
Figura 4.3 - Representação esquemática do ensaio de ultra-sons [19].....	21
Figura 4.4 - Ensaio de aderência pull-off [21].....	22

### Capítulo 5

Figura 5.1 - Molde laboratorial para a preparação dos provetes.....	26
Figura 5.2 - Mistura mecânica dos constituintes da argamassa.....	30
Figura 5.3 - Mesa de espalhamento.....	30
Figura 5.4 - Colocação da argamassa nos moldes para a elaboração dos provetes.....	31
Figura 5.5 - Ensaio para obter o módulo de elasticidade (ERUDIT MKIV - PC1004). .....	32
Figura 5.6 - Ensaio de resistência à flexão (SHIMADZU: AG-IC 100kN). .....	33
Figura 5.7 - Ensaio de resistência à compressão (SHIMADZU: AG-IC 100kN). .....	33
Figura 5.8 - Carbonatação.....	34
Figura 5.9 - Exsicador.....	35
Figura 5.10 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	35
Figura 5.11 - Ensaio de resistência aos sais, absorção por capilaridade da solução de NaCl.....	36
Figura 5.12 - Carbonatação das amostras.....	37
Figura 5.13 - Microscópio Eletrônico de Varrimento - SEM.....	37
Figura 5.14 - Colocação das diferentes camadas de argamassa nos blocos de adobe....	38



Figura 5.15 - Ensaio de aderência (Pull-off). .....	39
Figura 5.16 - Carbonatação em blocos de adobe. ....	39
Figura 5.17 - Ensaio com tubo Karsten em argamassas em blocos de adobe. ....	40
Figura 5.18 - Blocos de adobe dentro da câmara de ensaios climáticos (ESPEC: ARL-680). ....	41
Figura 5.19 - Colocação das argamassas na parede de adobe. ....	41
Figura 5.20 - Ensaio de aderência (Pull-off). ....	42
Figura 5.21 - Carbonatação na parede de adobe. ....	42
Figura 5.22 - Ensaio com tubo Karsten na parede de adobe. ....	43
Figura 5.23 - Ensaio PUNDIT. ....	44

## Capítulo 6

Figura 6.1 - Difração raio-x dos materiais constituintes das argamassas. ....	48
Figura 6.2 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 28 dias de cura. ....	50
Figura 6.3 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 90 dias de cura. ....	51
Figura 6.4 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 180 dias de cura. ....	51
Figura 6.5 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:2, aos 28 dias de cura. ....	53
Figura 6.6 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:2, aos 90 dias de cura. ....	53
Figura 6.7 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:2, aos 180 dias de cura. ....	54
Figura 6.8 - Difração raio-x das argamassas com areia de rio ao traço volumétrico 1:2, aos 28 dias de cura. ....	55
Figura 6.9 - Difração raio-x das argamassas de areia de rio ao traço volumétrico 1:2, aos 90 dias de cura. ....	56
Figura 6.10 - Difração raio-x das argamassas de areia de rio ao traço volumétrico 1:2, aos 180 dias de cura. ....	56
Figura 6.11 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 28 dias de cura. ....	58

Figura 6.12 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 90 dias de cura. ....	58
Figura 6.13 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 180 dias de cura. ....	59
Figura 6.14 - Imagens retiradas do SEM: A – AL; B – BAL; D – AL20MK e F – BAL20MK. ....	60
Figura 6.15 - Análise mineralógica da estrutura C assinalada na figura 7.14 – B. ....	61
Figura 6.16 - Análise mineralógica da estrutura E assinalada na figura 7.14 – D. ....	61
Figura 6.17 - Análise mineralógica da estrutura G assinalada na figura 7.14 – F. ....	62
Figura 6.18 - Imagens retiradas do SEM: A – AL; B – BAL; C – BAL; D – AL20MK; F – AL20MK; G – BAL20MK e H – BAL20MK. ....	63
Figura 6.19 - Análise mineralógica da estrutura E assinalada na figura 7.18 – D. ....	64
Figura 6.20 - Comparação gráfica dos valores de resistência à compressão das argamassas ao traço volumétrico 1:3 para as diferentes idades de cura. ....	69
Figura 6.21 - Comparação gráfica dos valores de resistência à compressão das argamassas ao traço volumétrico 1:2 para as diferentes idades de cura. ....	70
Figura 6.22 - Comparação gráfica dos valores de resistência à compressão das argamassas com areia de rio ao traço volumétrico 1:2 para as diferentes idades de cura. ....	71
Figura 6.23 - Comparação gráfica dos valores de resistência à compressão das argamassas sujeitas ao efeito de sais (NaCl) para as diferentes idades de cura. ....	72
Figura 6.24 - Comparação gráfica dos valores de resistência à flexão das argamassas com traço volumétrico 1:3 para as diferentes idades de cura. ....	65
Figura 6.25 - Comparação gráfica dos valores de resistência à flexão das argamassas com traço volumétrico 1:2 para as diferentes idades de cura. ....	66
Figura 6.26 - Comparação gráfica dos valores de resistência à flexão das argamassas com areia de rio com traço volumétrico 1:2 para as diferentes idades de cura. ....	67
Figura 6.27 - Comparação gráfica dos valores de resistência à flexão das argamassas sujeitas ao efeito de sais (NaCl) para as diferentes idades de cura. ....	68
Figura 6.28 - Comparação gráfica dos valores do módulo de elasticidade das argamassas ao traço volumétrico 1:3 para as diferentes idades de cura. ....	73
Figura 6.29 - Comparação gráfica dos valores do módulo de elasticidade das argamassas ao traço volumétrico 1:2 para as diferentes idades de cura. ....	74

Figura 6.30 - Comparação gráfica dos valores de módulo de elasticidade das argamassas com areia de rio ao traço volumétrico 1:2 para as diferentes idades de cura. ....	75
Figura 6.31 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 28 dias. ....	83
Figura 6.32 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 90 dias. ....	84
Figura 6.33 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 90 dias. ....	84
Figura 6.34 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 28 dias. ....	85
Figura 6.35 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 90 dias. ....	86
Figura 6.36 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 180 dias. ....	86
Figura 6.37 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 28 dias. ....	87
Figura 6.38 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 90 dias. ....	88
Figura 6.39 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 180 dias. ....	88
Figura 6.40 - Comparação gráfica dos valores da força de adesão para as diferentes camadas e tipos de argamassa aos 30 dias de cura. ....	95
Figura 6.41 - Comparação gráfica dos valores da força de adesão para as diferentes camadas e tipos de argamassa aos 60 dias de cura. ....	95
Figura 6.42 - Comparação gráfica dos valores da força de adesão para as diferentes camadas e tipos de argamassa aos 90 dias de cura. ....	96
Figura 6.43 - Comparação gráfica dos valores da força de adesão para os diferentes tipos de argamassa ao traço 1:3 de volume ao longo do tempo. ....	97
Figura 6.44 - Comparação gráfica dos valores da força de adesão para os diferentes tipos de argamassa ao traço 1:2 de volume ao longo do tempo. ....	98
Figura 6.45 - Degradação superficial observada na argamassa AL20MK com duas camadas. ....	102

## Anexos

Figura A.1 - Análise gravimétrica da argamassa AL em bloco de adobe com uma camada. ....	115
Figura A.2 - Análise gravimétrica da argamassa AL em bloco de adobe com duas camadas. ....	115
Figura A.3 - Análise gravimétrica da argamassa AL em bloco de adobe com duas camadas, sendo que a primeira é de chapisco. ....	116
Figura A.4 - Análise gravimétrica da argamassa AL20MK em bloco de adobe com uma camada. ....	116

Figura A.5 - Análise gravimétrica da argamassa AL20MK em bloco de adobe com duas camadas. ....	117
Figura A.6 - Análise gravimétrica da argamassa AL20MK em bloco de adobe com duas camadas, sendo que a primeira é de chapisco. ....	117
Figura A.7 - Análise gravimétrica da argamassa BAL em bloco de adobe com uma camada. ....	118
Figura A.8 - Análise gravimétrica da argamassa BAL em bloco de adobe com duas camadas. ....	118
Figura A.9 - Análise gravimétrica da argamassa BAL em bloco de adobe com duas camadas, sendo que a primeira é de chapisco. ....	119
Figura A.10 - Análise gravimétrica da argamassa BAL20MK em bloco de adobe com uma camada. ....	119
Figura A.11 - Análise gravimétrica da argamassa BAL20MK em bloco de adobe com duas camadas. ....	120
Figura A.12 - Análise gravimétrica da argamassa BAL20MK em bloco de adobe com duas camadas, sendo que a primeira é de chapisco. ....	120

## ÍNDICE DE TABELAS

### Capítulo 5

Tabela 5.1 - Constituição das argamassas a ensaiar. .... 25

Tabela 5.2 - Características dos ciclos “seco-molhado” ..... 28

### Capítulo 6

Tabela 6.1 - Massa volúmica aparente dos materiais constituintes das argamassas. .... 47

Tabela 6.2 - Análise química dos materiais utilizados na preparação das argamassas. . 48

Tabela 6.3 - Percentagens de carbonatação ..... 77

Tabela 6.4 - Percentagens de carbonatação ..... 78

Tabela 6.5 - Percentagens de carbonatação ..... 79

Tabela 6.6 - Estado de carbonatação das argamassas em blocos de adobe para as diferentes idades de cura..... 80

Tabela 6.7 - Estado de carbonatação das argamassas na parede de adobe para as diferentes idades de cura..... 81

Tabela 6.8 - Estado de carbonatação das argamassas na parede de adobe para as diferentes idades de cura..... 82

Tabela 6.9 - Coeficientes de capilaridade dos provetes de argamassa. .... 85

Tabela 6.10 - Coeficientes de capilaridade dos provetes de argamassa. .... 87

Tabela 6.11 - Coeficientes de capilaridade dos provetes de argamassa. .... 89

Tabela 6.12 - Resultado do ensaio de absorção de água sob pressão aos diferentes dias de cura, para uma camada de argamassa (2cm)..... 90

Tabela 6.13 - Resultado do ensaio de absorção de água sob pressão aos diferentes dias de cura, para duas camadas de argamassa (4cm)..... 90

Tabela 6.14 - Resultado do ensaio de absorção de água sob pressão aos diferentes dias de cura, para uma camada de argamassa mais chapisco..... 91

Tabela 6.15 - Resultado do ensaio de absorção de água sob pressão aos diferentes dias de cura..... 92

Tabela 6.16 - Resultado do ensaio de absorção de água sob pressão aos diferentes dias de cura..... 93

Tabela 6.17 - Resultados do ensaio de aderência para as argamassas em blocos de adobe aos diferentes dias de cura. ....	94
Tabela 6.18 - Resultados do ensaio de aderência para as argamassas na parede de adobe aos diferentes dias de cura. ....	97
Tabela 6.19 - Resultados do ensaio de aderência para as argamassas na parede de adobe aos diferentes dias de cura. ....	98
Tabela 6.20 - Resultados do ensaio com PUNDIT aos diferentes dias de cura. ....	99
Tabela 6.21 - Resultados do ensaio com PUNDIT aos diferentes dias de cura. ....	100

# *CAPÍTULO 1*

---

## *Introdução*

Enquadramento

Objetivo

Organização





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 ENQUADRAMENTO

Nos últimos anos a reabilitação de edifícios tem vindo a aumentar, quando comparada à nova construção, sobretudo devido a fatores sociais e económicos.

O uso do adobe é uma das técnicas de construção mais antigas, onde é utilizado não só em paredes, mas também na edificação de arcos, abóbadas e cúpulas. Este material é considerado viável, do ponto de vista económico e ecológico, por apresentar boas propriedades acústicas e térmicas, e a sua utilização estar associada a métodos simples e com poucos gastos energéticos.

Em Portugal, a construção em adobe localiza-se maioritariamente na zona do centro litoral, havendo uma crescente preocupação na sua recuperação/manutenção.

Uma das ações mais frequentes na reabilitação de edifícios antigos é a substituição das argamassas deterioradas. No entanto, este tipo de intervenção acarreta alguns problemas, pois nem sempre a escolha dos materiais de substituição é a mais correta. É necessário procurar garantir a compatibilidade entre as novas argamassas e o suporte, não descurando do seu aspeto final nem da sua reintegração.

Atualmente, é desejável conseguir reproduzir argamassas com as mesmas características do passado, logo há a necessidade de se realizarem estudos científicos que aumentem o conhecimento nessa área, possibilitando a conceção de soluções com adequado desempenho e que cumpram as funções que lhe são exigidas.

Estudos revelam que as argamassas de cal aérea são as mais compatíveis com a maioria das construções antigas, no entanto, e devido à utilização de materiais modernos, essa compatibilidade nem sempre está assegurada.

## **1.2 OBJETIVO**

Este tema tem como objetivo desenvolver argamassas de cal aérea e outros ligantes que sejam compatíveis para a reabilitação do património edificado em adobe.

Estas argamassas serão devidamente testadas e analisadas através de um processo experimental, fazendo uma analogia a situações reais, para que se possa seleccionar a que melhor cumpre os requisitos.

## **1.3 ORGANIZAÇÃO**

A presente dissertação encontra-se distribuída em sete capítulos.

O capítulo 1 é de introdução ao tema a estudar e o seu objetivo. Seguidamente, no segundo e no terceiro capítulos, com o apoio da pesquisa bibliográfica, são retratadas as propriedades das argamassas de cal e dos ligantes a estudar, também é feita uma breve descrição das construções em adobe, bem como das patologias que podem ocorrer neste tipo de construção.

No capítulo 4, também com apoio bibliográfico, são descritos alguns dos ensaios a realizar para o estudo deste tema.

O capítulo 5 aborda o trabalho a realizar e o trabalho desenvolvido em laboratório para atingir o objetivo pretendido.

Os resultados obtidos para os diferentes ensaios encontram-se no sexto capítulo, onde é feita uma análise comentada destes. Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões e aspetos que podem ser considerados em estudos futuros.

# ***CAPÍTULO 2***

---

## ***Uso de Argamassas de Cal na Reabilitação de Edifícios Antigos***

Definições Gerais

Propriedades das Argamassas de Cal

Ligantes



## **2 USO DE ARGAMASSAS DE CAL NA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS ANTIGOS**

### **2.1 DEFINIÇÕES GERAIS**

As argamassas são uma mistura composta por um ligante, agregados e água. Os ligantes mais comuns são a cal, o cimento ou o gesso. O agregado mais utilizado é a areia natural, embora possam ser utilizados o pó de pedra ou agregados britados. Normalmente, a argamassa é utilizada em alvenaria (assentamento), no tratamento das respectivas juntas e em sistemas de reboco [1, 2].

Na prática de conservação da construção, há alguma dificuldade na formulação de argamassas compatíveis para utilização em juntas e sistemas de reboco, devido a requisitos de baixo módulo de elasticidade, suficiente resistência à flexão e a um comportamento adequado em termos de absorção de água e de secagem. Quimicamente, os materiais devem também garantir questões de compatibilidade. Por estas razões, na maioria dos casos, a cal aérea é o ligante mais adequado, no entanto, envolve alguns problemas, tais como tempo de presa e endurecimento lentos, incapacidade de endurecer debaixo de água e falta de durabilidade [3].

As argamassas utilizadas na reabilitação/conservação de edifícios antigos devem possuir alguma resistência mecânica, no entanto se esta for muito elevada pode ser prejudicial, pois pode causar danos na alvenaria frágil e antiga. Também um elevado módulo de elasticidade da argamassa implica elevada rigidez, o que faz com que a argamassa não consiga acompanhar as deformações deste tipo de construção, levando assim à sua fendilhação [4].

Outro problema da construção em adobe é que não tem proteção contra a humidade por ascensão capilar e, sendo afetada pelas condições climatéricas, a penetração de água é inevitável. Por isso, a argamassa a utilizar deve ter a capacidade de secagem rápida de modo a evitar ou minimizar este tipo de problema [4].

## 2.2 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE CAL

As argamassas de cal são caracterizadas por:

- Trabalhabilidade: a cal melhora a plasticidade e a trabalhabilidade da argamassa fornecendo-lhe um elevado grau de coesão;
- Flexibilidade: a cal aumenta a capacidade da alvenaria se adaptar às tensões provocadas pelo movimento das construções e variações cíclicas sem fissuração excessiva;
- Capacidade de retenção de água: esta propriedade é importante quando a argamassa é utilizada em alvenaria com alta porosidade, pois a cal reduz a penetração de água em fendas nas juntas de argamassa endurecida;
- Resistência gelo-degelo: a argamassa de cal reduz o risco de entrada de água, reduzindo assim o risco de deterioração devido à ação gelo-degelo;
- Auto cura: a combinação da cal com a humidade e o CO<sub>2</sub> atmosférico ajuda a selar as fendas que se possam desenvolver através da formação de carbonato de cálcio;
- Resistência: o uso de cal na argamassa reduz a sua resistência à compressão e à flexão quando endurecida, adaptando-se assim à movimentação das construções;
- Eflorescência: as argamassas à base de cal minimizam o efeito de ocorrência de eflorescências, pois reduzem a quantidade de água que pode penetrar as unidades de alvenaria;
- Permeabilidade ao vapor: esta propriedade melhora com o aumento do teor de cal. Uma argamassa com elevado teor em cal faz com que o vapor de água passe do interior para o exterior de forma eficaz, permitindo que a estrutura “respire” [5].

## 2.3 LIGANTES

### 2.3.1 Cal

A cal é um dos ligantes mais antigos e resulta da calcinação do calcário constituído por CaCO<sub>3</sub>. A cal aérea resulta da decomposição através da temperatura de uma rocha com

percentagem maior ou igual a 95% de carbonato de cálcio, ou de cálcio e magnésio. Já a cal hidráulica tem origem numa pedra calcária com 8 a 20% de argila [2].

A cal aérea endurece lentamente, através da combinação com o dióxido de carbono atmosférico, para formar carbonato de cálcio como é demonstrado na Figura 2.1.

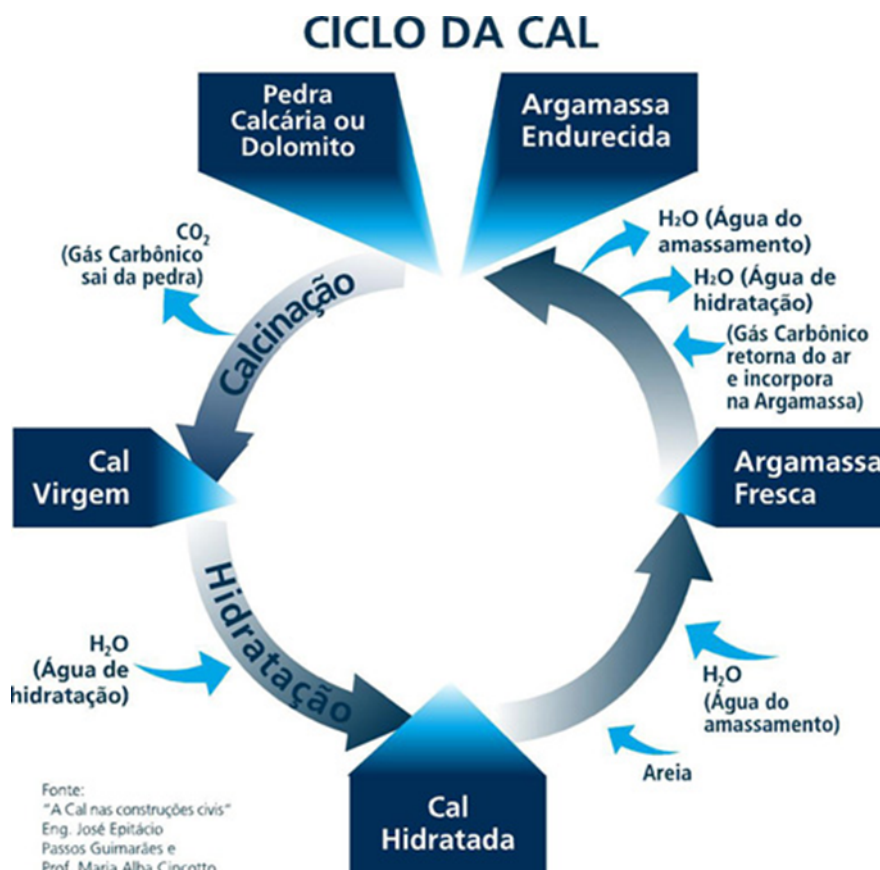


Figura 2.1 - O ciclo da cal [6].

### 2.3.2 Pozolanas

As pozolanas são o aditivo mais usado e pretendem garantir um aumento da resistência, da durabilidade e da capacidade hidráulica do reboco [4]. Estas são ricas em sílica e alumina e podem ser de dois tipos: naturais e artificiais.

Segundo Coutinho [7], as pozolanas naturais provêm de magmas geralmente ácidos, isto é, ricos em sílica, que solidificaram rapidamente durante uma erupção e que ficaram no estado amorfo ou cripto cristalino. A reatividade pozolânica aumenta ainda depois de esta lava ter sido meteorizada.

As pozolanas artificiais são obtidas através da desidratação e desidroxilação de qualquer tipo de argilas através da ação da temperatura.

#### **2.3.2.1 Metacaulino**

O metacaulino (MK) é um material pozolânico artificial que resulta da transformação do caulino quando este é sujeito a um aquecimento prolongado, a uma temperatura entre os 500 °C e os 800 °C e a um arrefecimento brusco.

Este material pozolânico tem vindo a ser cada vez mais utilizado devido às suas vantagens [8]:

- Aumento da resistência à flexão e à compressão;
- Diminuição da permeabilidade;
- Aumento da resistência ao ataque químico;
- Aumento da durabilidade;
- Reduz o aparecimento de eflorescências;
- Melhora a trabalhabilidade da argamassa.

O metacaulino é um aditivo pozolânico adequado para argamassas de cal, pois melhora as suas características mecânicas e de comportamento à água. Além disso estas argamassas de cal com pozolanas têm um impacto ambiental reduzido, quando comparadas com argamassas de cimento [9].

#### **2.3.2.2 Bentonite**

A bentonite é formada por argilas coloidais e altamente plásticas compostas principalmente por montmorilonita, argila mineral do grupo das esmectites, e é produzida pela desvitrificação “in situ” das cinzas vulcânicas. Para além da montmorilonita, a bentonite também pode conter outros minerais tais como quartzo, feldspato, vidro vulcânico, gesso e pirite.

Este material, com alguma reatividade pozolânica, tem um valor económico baixo e pode ser vendido em duas formas: sódica (Na) e cálcica (Ca).

A qualidade da bentonite depende de vários fatores tais como, a cor, a capacidade de absorção e dilatação e das propriedades reológicas e de troca. A composição química e



mineralógica da bentonite, bem como os parâmetros morfológicos das esmectites (os seus principais componentes), influenciam estas propriedades.

A bentonite sódica (Na) é caracterizada pela sua viscosidade e pela capacidade de absorver grande quantidade de água.

Na sua forma cálcica (Ca), a bentonite caracteriza-se pela menor capacidade de absorção de água e expansão e ainda por não ficar suspensa na água [10, 11].

Quimicamente, a bentonite é descrita como um silicato de alumínio hidratado que contém pequenas porções de metais alcalinos. Estes compostos têm aplicações desde a terapêutica à construção [10].



# ***CAPÍTULO 3***

---

## ***Construção em Adobe***

Considerações Gerais

Patologias em Edifícios Construídos com Adobe



### 3 CONSTRUÇÃO EM ADOBE

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A construção em terra é a técnica construtiva mais antiga e mais amplamente utilizada pelo Homem em todo o Mundo [12].

A construção em alvenaria resistente em adobe teve um grande impacto em Portugal em meados do século XX. Esta técnica construtiva verifica-se em várias tipologias dispersas por todo país, no entanto apresenta uma maior concentração no centro litoral.

Nos últimos anos, este tipo de construção tem sido alvo da reabilitação e conservação. Estas opções apresentam alguns entraves, devido à falta de informação das propriedades e características do adobe, bem como das argamassas, que têm cada vez mais vindo a ser estudadas para que estes problemas sejam ultrapassados e este tipo de construção possa ser preservado [13].

O revestimento dos edifícios em adobe é um elemento muito importante para a manutenção dos edifícios em condições adequadas e por isso, deve apresentar uma boa durabilidade e compatibilidade com este tipo de suporte, pois quando deixa de exercer a sua função o adobe sofre um processo de erosão muito rápido e acentuado [14].



Figura 3.1 - Casas em adobe [15].

### **3.2 PATOLOGIAS EM EDIFÍCIOS CONSTRUÍDOS COM ADOBE**

O levantamento das patologias mais frequentes e as suas possíveis causas, bem como soluções de correção e tratamento, são fundamentais para a realização de projetos de reabilitação e reforço das construções em adobe. As principais patologias neste tipo de construção manifestam-se devido à presença de água e deficiente comportamento das fundações. De modo a solucioná-las, deve-se sempre que possível eliminar as suas causas e substituir/reparar os elementos afetados.

As patologias mais frequentes neste tipo de alvenaria são [14]:

- Fissuração do adobe e dos seus revestimentos;
- Esmagamento localizado;
- Fissuras nos vãos das aberturas;
- Deformação excessiva;
- Empolamento e destacamento dos revestimentos;
- Fissuração na junção de paredes;
- Presença de manchas e humidades;
- Ocorrência de eflorescências;
- Degradação do adobe;
- Degradação dos revestimentos.

E as causas mais frequentes associadas a estas são:

- Presença de água;
- Ocorrência de assentamentos;
- Movimentos das fundações;
- Travamentos deficientes das paredes;
- Existência de cargas concentradas;
- Deformação excessiva dos elementos estruturais;
- Esforços elevados transmitidos por elementos externos;
- Solicitações induzidas por sismos;
- Comportamentos distintos de materiais diferentes;
- Utilização de revestimentos muito espessos e desadequados;
- Envelhecimento e degradação dos materiais;
- Ventilação insuficiente (no interior dos edifícios);
- Deficiente funcionamento das coberturas;

- Erros/deficiências construtivas.





# *CAPÍTULO 4*

---

## *Ensaaios*

Considerações Gerais

Ensaio de Permeabilidade à Água Sob Baixa Pressão

Determinação do Teor em Água por Gravimetria

Avaliação da Carbonatação

Absorção de Água por Capilaridade

Avaliação da Compacidade Utilizando o PUNDIT

Ensaio de Aderência Pull-Off



## **4 ENSAIOS**

### **4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Segundo Magalhães, Veiga [16], o uso de métodos não destrutivos como meio auxiliar na avaliação do estado de conservação dos revestimentos, pode revelar resultados interessantes. Com efeito, os métodos “in situ” são muito importantes para complementar a informação de laboratório, permitindo (i) determinar algumas características do revestimento, (ii) identificar as anomalias presentes e (iii) aumentar a precisão da avaliação efetuada através dos ensaios de laboratório.

### **4.2 ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA SOB BAIXA PRESSÃO**

Consiste em medir a quantidade de água absorvida por uma determinada superfície do reboco ou acabamento, após um determinado período de tempo, empregando para isto um conjunto de pequenos tubos graduados (de 0 a 4 cm<sup>3</sup>), em forma de cachimbo, que são fixados às zonas de parede que se quer estudar. As leituras da quantidade de água absorvida pelo revestimento são efetuadas com base no abaixamento do nível de água observado nos tubos graduados [16]. Este ensaio permite estimar o estado de degradação do material, neste caso a argamassa de revestimento.

### **4.3 DETERMINAÇÃO DO TEOR EM ÁGUA POR GRAVIMETRIA**

Segundo Magalhães, Veiga [16], este método consiste na pesagem do material recolhido na obra, em seu estado “natural” e na pesagem do material após secagem em estufa a uma determinada temperatura. O teor de água do material, através deste método, é calculado através da diferença de massas do material no estado inicial e após secagem.

### **4.4 AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO**

O método de ensaio para avaliação da carbonatação, consiste na aplicação de um indicador químico (em geral a fenolftaleína) sobre a superfície a analisar, onde este permite

indicar a presença de carbonato de cálcio. A mudança de cor da solução de fenolftaleína de incolor para rosa, que se faz notar em poucos minutos, indica a zona do revestimento não carbonatada permitindo assim, o cálculo da carbonatação [16, 17].



Figura 4.1 - Teste à fenolftaleína.

#### **4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE**

A absorção de água por capilaridade é medida utilizando provetes de argamassa nas condições prescritas à pressão atmosférica. Após a secagem e pesagem da massa constante, uma face da amostra é imersa em 5 a 10 mm de água por um determinado período de tempo. Ao fim desse tempo, o provete é novamente pesado determinando-se o aumento de massa. Assim, através da diferença entre a massa inicial (proвете seco) e a massa final, obtém-se o valor da água absorvida por capilaridade [18].

A secagem consiste na colocação dos provetes numa estufa a 65°C durante 24 horas, para a sua massa estabilizar, após esse tempo, estes são retirados e colocados no exsiccador para arrefecerem lentamente.



Figura 4.2 - Ensaio de capilaridade.

#### 4.6 AVALIAÇÃO DA COMPACIDADE UTILIZANDO O PUNDIT

O ensaio PUNDIT consiste na colocação dos transdutores em contacto com o material a ensaiar, neste caso, a argamassa em suporte de adobe. Este aparelho emite um impulso elétrico de baixa frequência, que é captado por um transmissor emissor e depois de atravessar o corpo a ensaiar, é conduzido a um transmissor recetor onde é transformado em impulso elétrico e novamente conduzido ao aparelho (Figura 4.3) [19].

Através deste ensaio, podemos determinar o tempo, em  $\mu s$ , que o impulso elétrico demora a atravessar o material a ensaiar. A propagação das ondas ultra-sónicas depende das propriedades elásticas do meio.

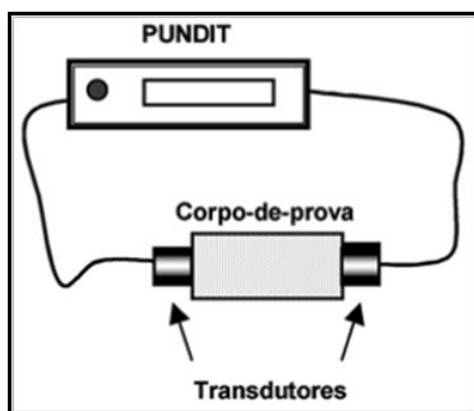


Figura 4.3 - Representação esquemática do ensaio de ultra-sons [19].

#### **4.7 ENSAIO DE ADERÊNCIA (PULL-OFF)**

O ensaio de aderência (pull-off) permite determinar a capacidade de aderência do rebo-  
co ao suporte. Esta tensão é determinada através da aplicação de uma força de tração  
direta perpendicular à superfície em estudo, como é demonstrado na Figura 4.4 [20].



Figura 4.4 - Ensaio de aderência pull-off [21].

# ***CAPÍTULO 5***

---

## ***Trabalho Laboratorial***

Trabalho a Realizar  
Trabalho Experimental





## 5 TRABALHO LABORATORIAL

### 5.1 TRABALHO A REALIZAR

#### 5.1.1 Considerações Gerais

Para o desenvolvimento deste tema, irá ser realizado um estudo do comportamento de argamassas de cal aérea com a adição de materiais pozolânicos artificiais e naturais, respectivamente o metacaulino e a bentonite. Os ensaios serão realizados aos diferentes tipos de argamassas, substituindo o ligante pelas seguintes percentagens em massa:

Tabela 5.1 - Constituição das argamassas a ensaiar.

ARGAMASSAS	MATERIAIS
AL	Cal aérea + areia
AL20MK	Cal aérea + 20% de metacaulino + areia
BAL	Cal aérea + 5% de bentonite + areia
BAL20MK	Cal aérea + 5% de bentonite + 20% de metacaulino + areia

As quatro composições de argamassas vão ser experimentalmente estudadas nas seguintes formas:

- Argamassa com areia calibrada ao traço volumétrico 1:3;
- Argamassa com areia calibrada ao traço volumétrico 1:2;
- Argamassa com areia de rio ao traço volumétrico 1:2.

### 5.1.2 Etapas do Trabalho

#### i) Preparação dos moldes laboratoriais

Esta etapa envolve a preparação das argamassas e a sua colocação nos moldes específicos para a obtenção dos provetes a ensaiar à idade de 28, 90 e 180 dias.

Os testes a realizar aos provetes de argamassas ao traço 1:3 em volume são:

- Resistência à flexão;
- Resistência à compressão;
- Módulo de elasticidade;
- Capacidade de absorção de água;
- Secagem;
- Teste de fenolftaleína;
- Resistência aos sais (solução NaCl).

Para os provetes de argamassas ao traço 1:2 em volume, serão feitos os mesmos ensaios, exceto o ensaio de resistência aos sais.



Figura 5.1 - Molde laboratorial para a preparação dos provetes.

Após a preparação dos moldes, estes serão colocados em condições de cura específicas. Os moldes com a argamassa de cal aérea e areia (AL) serão colocados numa câmara a 20°C e 65% de humidade relativa (HR), os restantes serão colocados num ambiente de

20°C e 95% HR durante 7 dias, ao fim dos quais os provetes serão desmoldados e ficarão todos guardados na câmara a 20°C e 65% HR até à idade de teste.

### **ii) Aplicação das argamassas numa parede em adobe**

Para esta segunda etapa, os diferentes tipos de argamassas serão aplicadas numa parede em adobe (chapisco + uma camada (2 cm)) e testados mensalmente durante três meses, através dos testes de:

- Aderência (pull-off);
- Absorção sob pressão (tubos Karsten);
- Avaliação da compacidade (PUNDIT);
- Carbonatação;
- Suscetibilidade à fendilhação.

### **iii) Aplicação das argamassas em blocos de adobe**

Esta etapa envolve a aplicação dos diferentes tipos de argamassas em blocos de adobe, os quais vão estar sujeitos a condições de cura controladas, isto é, nos primeiros 7 dias estarão sujeitos a condições de 20°C e 95% HR e os restantes dias a 20°C e 65% HR.

As argamassas serão aplicadas nos blocos de adobe da seguinte forma:

- Uma camada (2 cm);
- Duas camadas (2x2 cm);
- Duas camadas (chapisco + uma camada 2 cm).

E serão realizados, mensalmente durante três meses, os seguintes testes:

- Aderência (pull-off);
- Absorção de água sob pressão (tubos Karsten);
- Carbonatação;
- Suscetibilidade à fendilhação.

### **iv) Avaliação da capacidade de meteorização – envelhecimento artificial**

Nesta etapa os diferentes tipos de argamassas serão aplicados nos blocos de adobe da mesma forma que na etapa anterior:

- Uma camada (2 cm);
- Duas camadas (2x2 cm);
- Duas camadas (chapisco + uma camada 2 cm).

Os blocos de adobe serão submetidos, numa câmara climática, a ciclos “seco-molhado”, conforme a Tabela 5.2. No fim de cada ciclo será realizado um teste de gravimetria verificando-se assim, o estado de degradação de cada amostra.

Tabela 5.2 - Características dos ciclos “seco-molhado”.

<b>Ciclo</b>	<b>Duração (horas)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Humidade relativa do ar (%)</b>
“Verão” (24 horas)	3	60	95
	3	10	40
“Inverno” (24 horas)	3	30	95
	3	-10	95

## 5.2 TRABALHO EXPERIMENTAL

### 5.2.1 Considerações Gerais

Para o desenvolvimento deste trabalho começou-se por caraterizar quimicamente os diferentes materiais a utilizar nos vários tipos de argamassas, seguidamente procedeu-se à sua preparação para, posteriormente, serem ensaiados de forma a avaliar o seu comportamento.

### 5.2.2 Materiais

Os materiais utilizados foram os seguintes:

- Areia - APAS 12, APAS 20 e APAS 30, Areipor – Areias Portuguesas, Lda, Bucelas, Portugal;
- Areia de rio;
- Cal aérea comercial (AL do inglês *air lime*) – Lusical H100, Portugal com classificação de CL90;
- Metacaulino 1200S (MK do inglês *metakaolin*) – AGS Mineraux, França;

- Bentonite A 020 – natural, Ca-bentonite, depósito Jelšový Potok, Envigeo a.s., Banska Bystrica, Eslováquia.

### **5.2.3 Preparação das Argamassas**

Foram preparadas doze (4x3) composições de argamassas distintas para serem experimentalmente estudadas, sendo que estas têm como principal diferença o traço volumétrico, pois realizaram-se amostras ao traço 1:3 e ao traço 1:2, e ainda o tipo de areia usada: areia de rio e areia calibrada.

Argamassas produzidas e analisadas:

- Argamassa composta por cal aérea e areia (AL);
- Argamassa composta por cal aérea, areia e 5% de bentonite (BAL);
- Argamassa composta por cal aérea, areia e 20% de metacaulino (AL20MK);
- Argamassa composta por cal aérea, areia, 20% de metacaulino e 5% de bentonite (BAL20MK).

#### **5.2.3.1 Provetes**

A preparação dos provetes de argamassa iniciou-se com a pesagem e mistura homogênea manual dos constituintes secos, posteriormente colocados na misturadora e sujeitos a 150 segundos de mistura mecânica a velocidade lenta, com a colocação de aproximadamente 20% de água nos primeiros 15 segundos. Após este tempo, parou-se a misturadora e raspou-se o material aderido à pá e à cuba, de seguida prosseguiu-se com a mistura mecânica lenta durante mais 30 segundos (Figura 5.2).



Figura 5.2 - Mistura mecânica dos constituintes da argamassa.

Após a preparação das argamassas, estas foram sujeitas ao teste de espalhamento, com intuito de verificar a sua consistência que, neste caso, se situou entre os 120-140 mm. Neste ensaio, a argamassa foi colocada num molde próprio em duas camadas, centrado sobre a mesa de espalhamento (Figura 5.3), e compactada 15 vezes no fim de cada camada. O molde foi retirado e a argamassa sujeita a 15 pancadas na mesa [22].

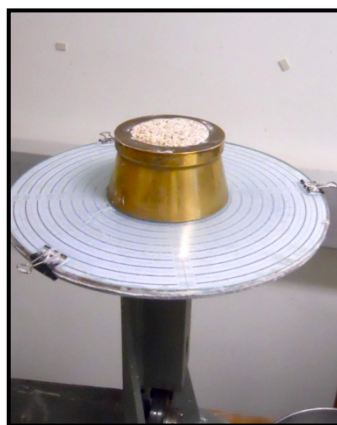


Figura 5.3 - Mesa de espalhamento.

De seguida, para a determinação da massa volúmica aparente de cada mistura, procedeu-se da seguinte forma:

- 1) Colocaram-se duas camadas de argamassa num recipiente com volume e massa conhecidos, compactando-se 15 vezes no final de cada camada;

- 2) Pesou-se o conjunto (recipiente + argamassa);
- 3) Ao conjunto, foi retirado o valor da massa do recipiente, obtendo-se assim o valor de argamassa contido nele;
- 4) Procedeu-se ao cálculo da massa volúmica aparente através da seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{m_a}{V}$$

Onde:

- $\rho$  Massa volúmica aparente (Kg/m<sup>3</sup>);
- $m_a$  Massa da argamassa (Kg);
- $V$  Volume do recipiente (m<sup>3</sup>).

Por fim, as diferentes composições de argamassas foram colocadas em moldes, previamente oleados. Cada molde encontra-se dividido em três, que corresponde aos três provetes a ensaiar aos 28, 90 e 180 dias.

Colocou-se a argamassa em duas camadas nas três divisões de cada molde, compactando 20 vezes no fim de cada camada, retirou-se o excesso de argamassa e voltou-se a compactar 20 vezes, de forma a distribuir a argamassa uniformemente pelo molde.



Figura 5.4 - Colocação da argamassa nos moldes para a elaboração dos provetes.

Preparados os moldes, estes foram devidamente identificados e submetidos a condições de cura reguladas, 95% de humidade relativa e 20°C, numa câmara climática durante sete dias, ao fim desse tempo foram transferidos para outra câmara com diferentes condições climáticas, 65% de humidade relativa e 20°C, até ao dia de teste.

### **5.2.3.1.1 Ensaios realizados aos provetes**

#### **5.2.3.1.1.1 Módulo de elasticidade**

Ao fim de 28, 90 e 180 dias de cura, foi determinado o módulo de elasticidade dinâmico para cada provete de argamassa com recurso a ERUDITE MKIV (PC1004), segundo as normas do fabricante.

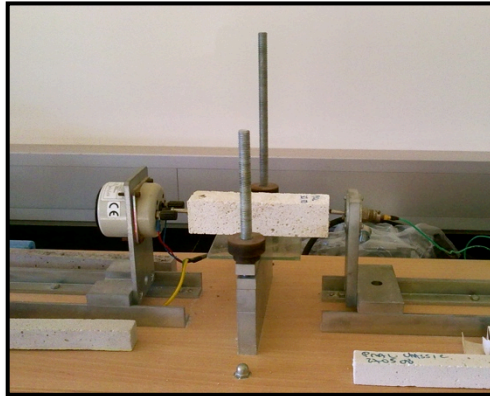


Figura 5.5 - Ensaio para obter o módulo de elasticidade (ERUDIT MKIV - PC1004).

#### **5.2.3.1.1.2 Resistência à flexão**

Este ensaio foi realizado aos 28, 90 e 180 dias de cura com recurso à máquina universal de ensaios (SHIMADZU: AG-IC 100kN) com uma célula de carga de 5kN. O provete foi colocado no suporte da máquina e centrado perpendicularmente à célula de carga, sujeito a uma força gradualmente aplicada na sua superfície até à rotura (Figura 5.6).

O ensaio foi realizado a três provetes com a mesma composição de argamassa, sendo o valor final de resistência à flexão a média dos três valores.



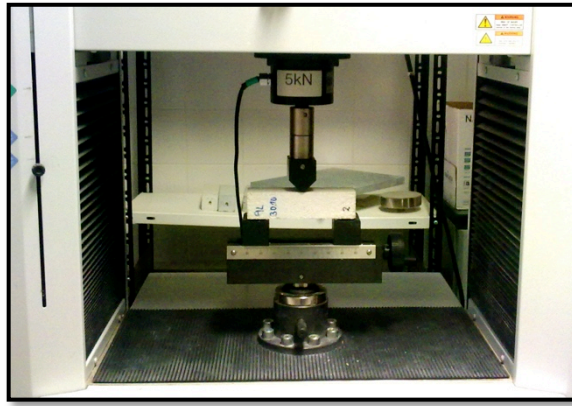


Figura 5.6 - Ensaio de resistência à flexão (SHIMADZU: AG-IC 100kN).

#### 5.2.3.1.1.3 Resistência à compressão

O ensaio à compressão é feito na metade do provete resultante do ensaio à flexão. Tal como anteriormente, os provetes foram ensaiados aos 28, 90 e 180 dias de cura e foi utilizada a máquina de ensaios universal (SHIMADZU: AG-IC 100kN) com célula de carga de 5kN. Centrou-se a metade do provete entre os suportes, ao qual foi aplicada uma força gradual até ser atingida a rotura (Figura 5.7).

O valor final da resistência à compressão é a média dos valores obtidos para os três provetes com a mesma composição.

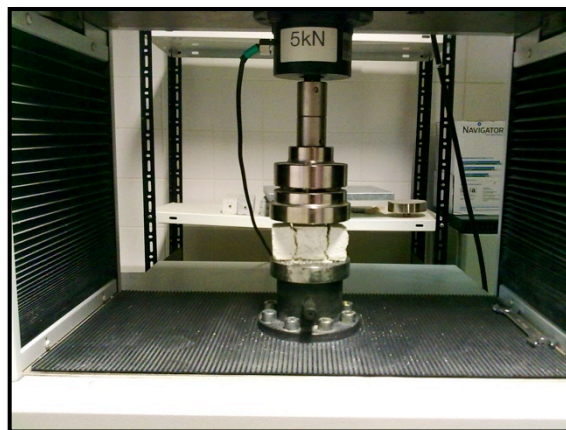


Figura 5.7 - Ensaio de resistência à compressão (SHIMADZU: AG-IC 100kN).

#### **5.2.3.1.1.4 Carbonatação**

Este ensaio foi realizado aos 28, 90 e 180 dias numa parte do provete não esmagada durante o ensaio de resistência à compressão.

Foi utilizada uma solução de fenolftaleína que confere uma cor rosa à parte não carbonatada, ficando a parte carbonatada incolor, como se pode ver na Figura 5.8. Assim, e com recurso a um paquímetro foi possível medir a espessura carbonatada.

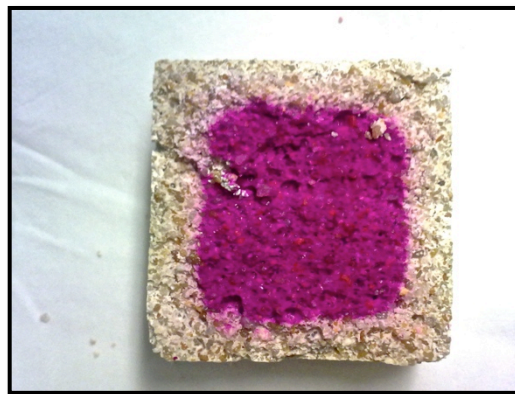


Figura 5.8 - Carbonatação.

#### **5.2.3.1.1.5 Absorção de água por capilaridade**

Para este ensaio foi utilizada a metade restante do provete utilizado no ensaio à flexão aos 28, 90 e 180 dias de cura.

Antes do ensaio foi necessário colocar os provetes dentro de uma estufa a  $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas para que a sua massa estabilizasse. Ao fim desse tempo, estas amostras foram colocadas dentro de um exsiccador (Figura 5.9) para que o seu arrefecimento fosse lento e em condições de humidade controladas.



Figura 5.9 - Exsicador.

Após o seu arrefecimento, os provetes foram pesados e colocados em cima de um esfregão, dentro de um tabuleiro com cerca de 5 mm de água. Procedeu-se ao ensaio, pesando-se várias vezes os provetes até estes estabilizarem o seu peso.

Após o ensaio, os provetes ficaram à temperatura ambiente e foram feitos registos do seu peso até este estabilizar novamente.



Figura 5.10 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.

#### 5.2.3.1.1.6 Resistência aos sais

Neste ensaio os provetes foram submetidos a ciclos, de 7 horas de absorção por capilaridade de uma solução de NaCl (27g de NaCl para 1L de água) na câmara climática a 20°C e 65% de humidade relativa e 17 horas de secagem na estufa a 65°C, durante duas semanas (10 ciclos).

Antes de iniciar o ensaio, os provetes foram colocados na estufa a 65°C durante 24 horas para a sua massa estabilizar e posteriormente, foram colocados no exsiccador para arrefecerem lentamente em condições de humidade controlada.

No fim de cada ciclo, os provetes foram pesados e visualmente analisados para verificar a existência de alterações na sua estrutura devidas à deposição de sais. Após duas semanas de ciclos, os provetes foram colocados na câmara climática a 20°C e 65% de humidade relativa (HR) para repousar durante mais duas semanas. Ao fim desse tempo, foram submetidos a ensaios para verificar a sua resistência mecânica (resistência à compressão e à flexão) e analisados por difração raio-x e no microscópio eletrónico (SEM).

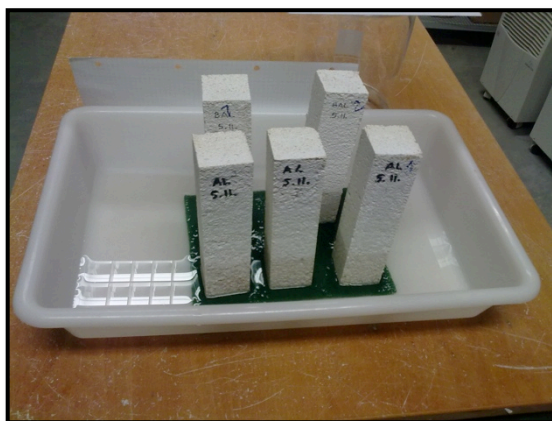


Figura 5.11 - Ensaio de resistência aos sais, absorção por capilaridade da solução de NaCl.

#### **5.2.3.1.1.7 Análise mineralógica (DRX)**

Cada composição de argamassa foi analisada aos 28, 90 e 180 dias de cura. Para isso foi retirado uma parte do provete resultante do ensaio à compressão e passada no peneiro 0,150 mm, para evitar intensas difrações de quartzo. Este pó foi analisado mineralogicamente por difração raio-x (DRX) com recurso ao aparelho de medição Philips X 'Pertdiffractometer, equipado com radiação CuK $\alpha$ . Também foi usado o aparelho Panalytical Axios X-ray Fluorescence Spectrometer para fazer a análise química.

#### 5.2.3.1.1.8 SEM - “Scanning Electron Microscope”

As diferentes composições de argamassa foram analisadas no microscópio eletrónico de varrimento (SEM) para obter o seu aspeto morfológico. Antes de serem inseridas no microscópio, estas pequenas partículas retiradas dos vários provetes de argamassa foram inseridas numa máquina de deposição de carbono, para quando o feixe de eletrões do microscópio incidisse nelas houvesse um contraste e fosse possível a sua visualização.



Figura 5.12 - Carbonatação das amostras.



Figura 5.13 - Microscópio Eletrónico de Varrimento - SEM.

### 5.2.3.2 Blocos de adobe

Relativamente aos blocos de adobe, foram aplicadas apenas as composições de argamassa ao traço volumétrico 1:3. A sua confeção foi semelhante à dos provetes, exceto a camada de chapisco, à qual foi adicionada maior quantidade de água para facilitar a sua aplicação, cerca de 60%.

Depois de devidamente limpos, cada bloco de adobe foi salpicado com água e aplicou-se a argamassa da seguinte forma (Figura 5.14):

- 1) Uma camada de argamassa de dois centímetros;
- 2) Duas camadas de argamassa de dois centímetros cada;
- 3) Uma camada de chapisco e uma camada de argamassa de dois centímetros.

Entre a aplicação da primeira e da segunda camada passaram 24 horas, para que estas secassem por forma a facilitar a aplicação da segunda camada.



Figura 5.14 - Colocação das diferentes camadas de argamassa nos blocos de adobe.

#### 5.2.3.2.1 Ensaios realizados às argamassas em blocos de adobe

##### 5.2.3.2.1.1 Aderência (Pull-off)

Ao fim de 1, 2 e 3 meses de cura, as argamassas em blocos de adobe foram submetidas ao ensaio de aderência (pull-off). Para a execução deste ensaio foi necessário, com ajuda de ferramentas específicas, cortar um círculo na argamassa do tamanho das pastilhas usadas no ensaio, que foram posteriormente coladas à argamassa com recurso a uma mistura de resinas. Os blocos de adobe foram colocados na máquina de ensaios universal, SHIMADZU: AG-IC 100kN, e a célula de 5kN foi encaixada na pastilha, dando-se



início ao ensaio. O adobe ficou sujeito a uma força gradualmente aplicada até à rotura da argamassa.

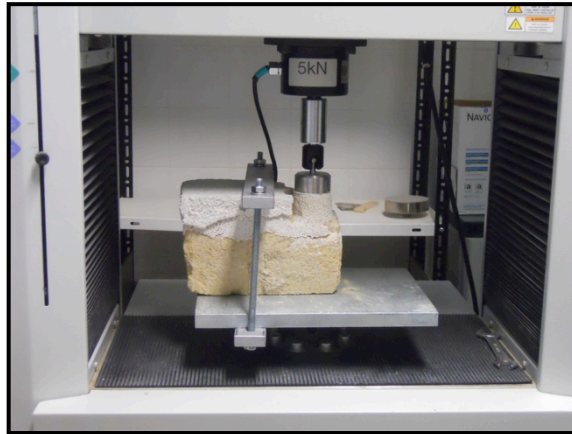


Figura 5.15 - Ensaio de aderência (Pull-off).

#### 5.2.3.2.1.2 Carbonatação

Este ensaio foi realizado após o ensaio pull-off a 1, 2 e 3 meses de cura. Raspou-se a parte cortada com a ajuda de uma espátula e utilizou-se a solução de fenolftaleína para verificar o estado de carbonatação das argamassas no adobe. A parte carbonatada foi medida a partir da parte superior da argamassa.



Figura 5.16 - Carbonatação em blocos de adobe.

#### **5.2.3.2.1.3 Absorção de água sob baixa pressão**

Para a realização deste ensaio foi necessário utilizar tubos Karsten, que foram colados à argamassa dos blocos de adobe com silicone, após a secagem do silicone, encheu-se o tubo até aos 4 ml e mediu-se o tempo que a água demorou a absorver de 1 em 1 ml.

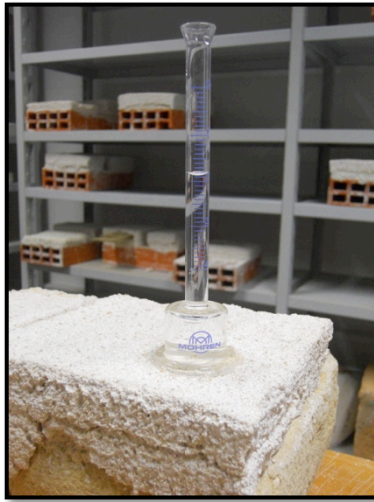


Figura 5.17 - Ensaio com tubo Karsten em argamassas em blocos de adobe.

#### **5.2.3.2.1.4 Envelhecimento artificial acelerado**

Para este ensaio foi necessário a preparação de mais três adobes (uma camada, duas camadas e uma camada de chapisco mais uma camada) para cada composição de argamassa. Estes adobes foram ainda isolados com gaze a toda a sua volta e na parte de baixo, de modo a evitar perda de material. Foi feita a sua pesagem e foram colocados dentro da câmara de ensaios climáticos (ESPEC: ARL-680) e sujeitos a ciclos “seco-molhado” como indicado na Tabela 5.2.





Figura 5.18 - Blocos de adobe dentro da câmara de ensaios climáticos (ESPEC: ARL-680).

### 5.2.3.3 Parede de Adobe

Na parede de adobe foram aplicadas as argamassas ao traço volumétrico 1:3 e 1:2. O processo de preparação foi idêntico ao dos provetes e dos adobes, exceto na percentagem de água. A sua aplicação foi feita em duas camadas, uma de chapisco e passado 24 horas, aplicou-se a segunda camada de aproximadamente 2 centímetros (Figura 5.19).



Figura 5.19 - Colocação das argamassas na parede de adobe.

### **5.2.3.3.1 Ensaios realizados na parede de adobe**

#### **5.2.3.3.1.1 Pull-off**

O ensaio de aderência na parede de adobe foi feito a 1, 2 e 3 meses de cura. As argamassas foram sujeitas ao mesmo processo de corte e de colagem das pastilhas usado nos blocos de adobe. Para a execução deste ensaio na parede recorreu-se ao aparelho pull-off (Figura 5.20).



Figura 5.20 - Ensaio de aderência (Pull-off).

#### **5.2.3.3.1.2 Carbonatação**

Para verificar o estado de carbonatação das argamassas na parede de adobe procedeu-se de igual modo aos blocos de adobe (Figura 5.21).



Figura 5.21 - Carbonatação na parede de adobe.

#### **5.2.3.3.1.3 Absorção de água sob baixa pressão**

Este ensaio foi semelhante ao que foi feito nos blocos de adobe, mas recorrendo a tubos Karsten próprios para superfícies verticais. Ensaiou-se a 1, 2 e 3 meses de cura (Figura 5.22).



Figura 5.22 - Ensaio com tubo Karsten na parede de adobe.

#### **5.2.3.3.1.4 PUNDIT**

O ensaio, com o aparelho PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester), permitiu determinar a velocidade de propagação das ondas emitidas por este. Para isso, foi necessário antes de cada ensaio calibrar o aparelho, depois foram feitas medições com 10 centímetros de distância entre as células. Assim, calculou-se a velocidade de propagação das ondas e fez-se uma análise relativamente às diferentes composições de argamassa e tempos de cura, sendo que este ensaio foi realizado a 1, 2 e 3 meses de cura (Figura 5.23).



Figura 5.23 - Ensaio PUNDIT.

# ***CAPÍTULO 6***

---

## ***Resultados***

Considerações Gerais

Massa Volúmica Aparente

Análise Química e Mineralógica

Análise Através do Microscópio Eletrónico de Varrimento (SEM)

Análise das Propriedades Mecânicas dos Provetes de Argamassa

Avaliação da Carbonatação

Absorção de Água por Capilaridade

Absorção de Água Sob Pressão

Ensaio de Aderência (Pull-Off)

Avaliação da Compacidade Utilizando o PUNDIT

Envelhecimento Artificial Acelerado



## 6 RESULTADOS

### 6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos nos ensaios descritos anteriormente para a seleção da composição de argamassa que melhor se adequa ao estudo em questão.

### 6.2 MASSA VOLÚMICA APARENTE

Para os diferentes materiais constituintes das argamassas foi calculada a sua massa volúmica aparente. O resultado apresenta-se na tabela seguinte:

Tabela 6.1 - Massa volúmica aparente dos materiais constituintes das argamassas.

<b>Materiais</b>	<b>Massa volúmica aparente (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>APAS 12</b>	1444,4
<b>APAS 20</b>	1405,0
<b>APAS 30</b>	1381,3
<b>Areia de rio</b>	1559,3
<b>Cal aérea</b>	395,7
<b>Metacaulino</b>	296,0
<b>Bentonite</b>	719,3

Através da análise da massa volúmica aparente pode-se verificar que a areia de rio é o material com maior massa volúmica (1559,3 kg/m<sup>3</sup>), seguido das areias calibradas, também elas com massa volúmica elevada. O material menos denso é o metacaulino que apresenta uma massa volúmica de 296,0 kg/m<sup>3</sup>.

6.3 ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA

6.3.1 Materiais

Na Tabela 6.2 encontram-se os resultados obtidos através de uma análise química, feita aos materiais utilizados na preparação das diferentes composições de argamassas.

Tabela 6.2 - Análise química dos materiais utilizados na preparação das argamassas.

	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	LOI (%)
APAS 12	92,86	3,77	0,23	nd	nd	0,10	nd	3,14	0,02	0,03	0,35
APAS 20	95,30	2,51	0,14	nd	nd	0,06	nd	2,24	0,02	0,04	0,29
APAS 30	93,17	3,76	0,13	nd	nd	0,03	nd	3,15	0,04	0,05	0,22
Areia de rio	96,45	2,01	0,20	0,01	nd	0,09	nd	1,14	0,09	0,02	0,22
Cal aérea LUSICAL	nd	0,01	0,15	0,01	3,09	76,74	nd	0,02	0,04	0,01	20,45
Metacaulino 1200 S	54,39	39,36	1,75	0,01	0,14	0,10	nd	1,03	1,55	0,06	1,90
Bentonite	63,00	19,50	2,60	nd	3,90	1,70	0,40	0,90	nd	nd	6,20

A Figura 6.1 retrata a estrutura cristalina, obtida através de difração raio-x, de cada material utilizado na preparação das argamassas.

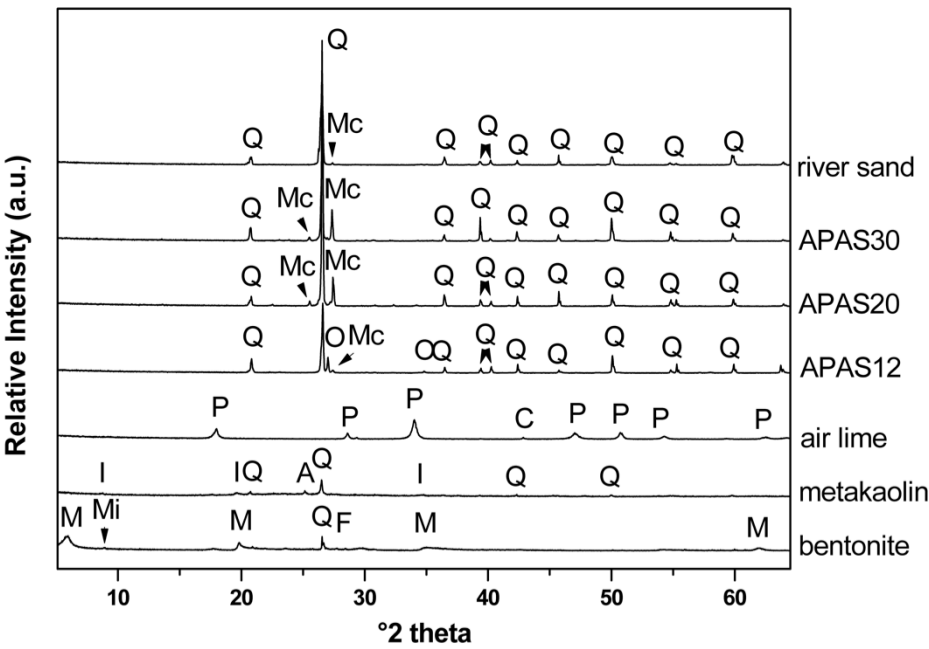


Figura 6.1 - Difração raio-x dos materiais constituintes das argamassas.



Onde:

- Q - Quartzo
- Mc - Microclina
- O - Ortóclase
- P - Portlandite
- C - Calcite
- I - Ilita
- A - Anátase
- M - Montmorilonita
- Mi - Mica
- F - Feldspato

Através da observação das análises química e mineralógica, feitas aos materiais constituintes das argamassas, é possível fazer uma correspondência entre elas e melhor perceber a sua estrutura.

São visíveis picos de quartzo (Q) para os quatro tipos de areias, os quais estão associados às grandes percentagens de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) nelas presentes. A composição das areias APAS são semelhantes, o pico de microclina (Mc) está relacionado com as percentagens de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) presentes no feldspato alcalino. A areia de rio apresenta menor pico de microclina devido às menores percentagens de  $\text{K}_2\text{O}$ , quando comparada com as outras areias (Tabela 6.2 e Figura 6.1).

Quanto à cal, esta apresenta a maior percentagem de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) que está relacionada com os picos de portlandite (P) e calcite (C). As maiores percentagens de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e sílica ( $\text{SiO}_2$ ), presentes no metacaulino, estão relacionadas com o aparecimento de ilita e quartzo, como verificado na análise DRX (Figura 6.1).

Por fim, o principal constituinte da bentonite é a montmorilonita, bem como o quartzo, mica e feldspato, sendo que em menor percentagem. Os picos de montmorilonita (M) e de mica (Mi) estão associados à presença de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , enquanto a percentagem de  $\text{K}_2\text{O}$  obtida através da análise química, está relacionada com a presença de mica e feldspato.

### 6.3.2 Argamassas

As diferentes composições de argamassas também foram analisadas mineralogicamente através de difração raio-x aos 28, 90 e 180 dias de cura. Nas figuras seguintes apresentam-se os resultados obtidos.

Onde:

- Q - Quartzo
- Mc - Microclina
- P - Portlandite
- C - Calcite
- C<sub>1</sub> - C<sub>4</sub>A $\bar{C}$ H<sub>11</sub>

#### 6.3.2.1 Argamassas ao traço volumétrico 1:3

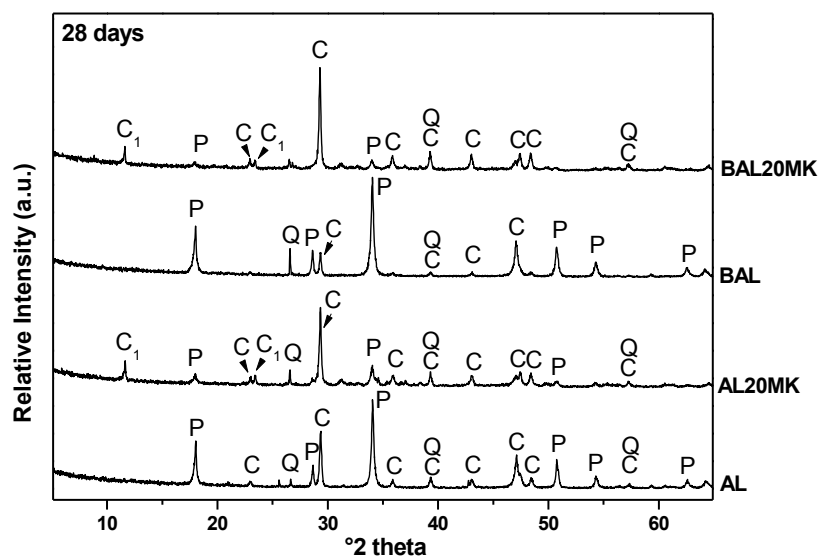


Figura 6.2 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 28 dias de cura.

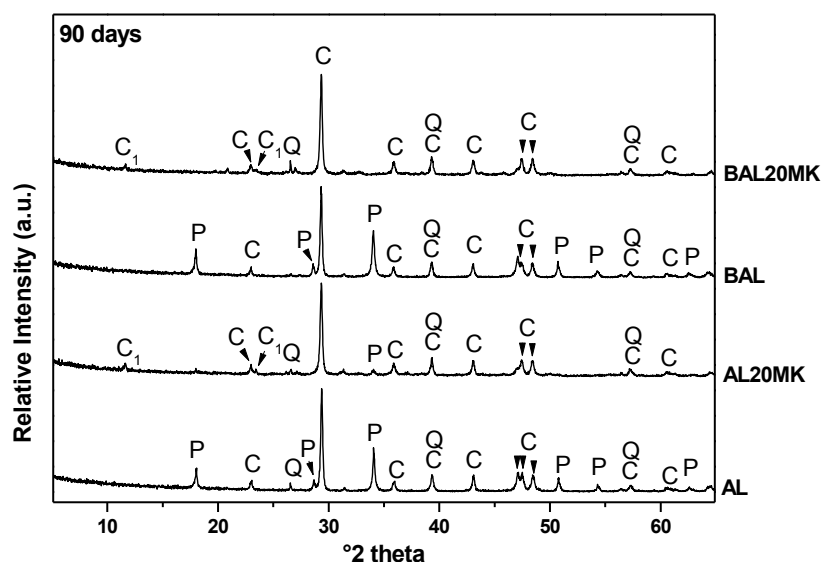


Figura 6.3 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 90 dias de cura.

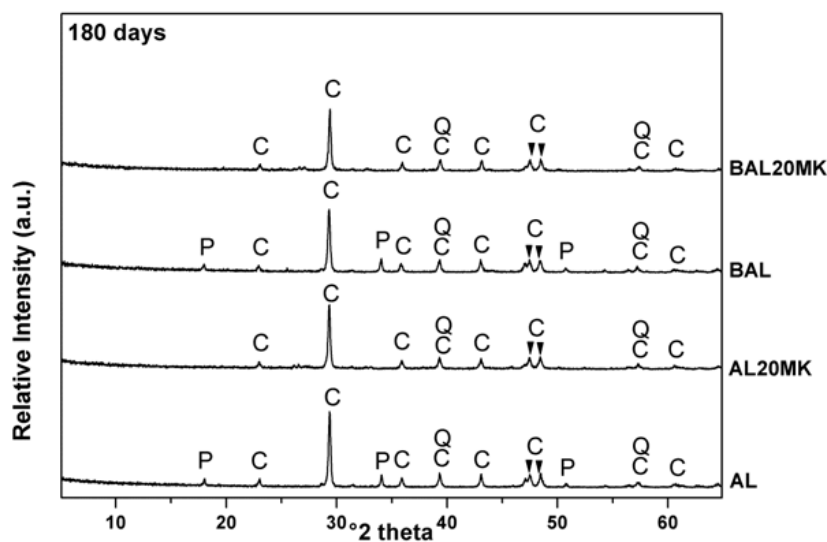


Figura 6.4 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 180 dias de cura.

A ocorrência de carbonatação nas amostras das argamassas está relacionada com o consumo de portlandite na sua estrutura.

Através da Figura 6.2, Figura 6.3 e Figura 6.4 pode-se verificar que todas as amostras de argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 28 dias de cura, são caracterizadas por um pico intenso de portlandite (P) e por um pico de calcite (C) de menor intensidade (Figura 6.2).

A bentonite foi utilizada como ligante nas composições de argamassas, pela sua capacidade de absorção de água e por atrasar o processo de carbonatação, como se pode comprovar pela Figura 6.2, onde BAL apresenta picos de portlandite mais intensos quando comparada a AL. Também esta amostra de BAL, para os 28 dias de cura, é a que apresenta menor zona carbonatada.

Apenas as amostras que contêm metacaulino apresentam picos de  $C_1$  ( $11.2^\circ 2\theta$  e  $23.9^\circ 2\theta$ ), mineral pozolânico resultante das reações pozolânicas do metacaulino.

Aos 90 dias de cura, a amostra de BAL20MK não contém portlandite, enquanto AL20MK apresenta uma quantidade insignificante deste mineral (Figura 6.3). Isto significa que a portlandite foi consumida durante os processos pozolânico e de carbonatação.

Também se verifica para esta idade de cura, que os picos correspondentes a  $C_1$  diminuíram de intensidade, relativamente às amostras com 28 dias de cura, este facto também foi verificado por Gameiro *et al.* [23].

O processo de carbonatação está completo para as argamassas BAL20MK e AL20MK aos 180 dias de cura, por isso não se verifica a existência de portlandite na análise de DRX. O pico de calcite (C) traduz o endurecimento total dos provetes.

O mineral pozolânico  $C_1$  não está presente nas amostras que contêm metacaulino, este comportamento poderá estar relacionado com a baixa resistência à flexão, obtida para os provetes com metacaulino aos 180 dias de cura.

As argamassas BAL e AL ainda contêm portlandite aos 180 dias de cura, logo, o seu processo de carbonatação ainda não se encontra completo. No entanto, os resultados verificados no teste de carbonatação a esta idade de cura são contraditórios.

### 6.3.2.2 Argamassas ao traço volumétrico 1:2

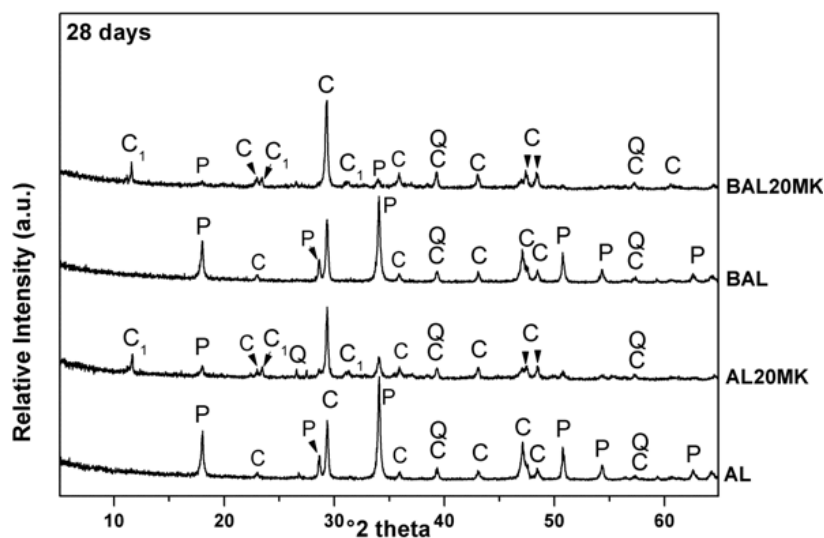


Figura 6.5 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:2, aos 28 dias de cura.

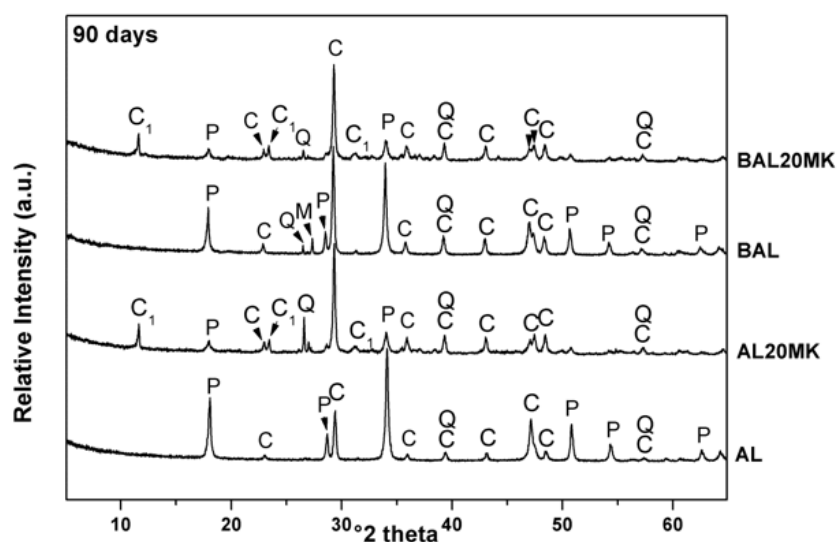


Figura 6.6 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:2, aos 90 dias de cura.

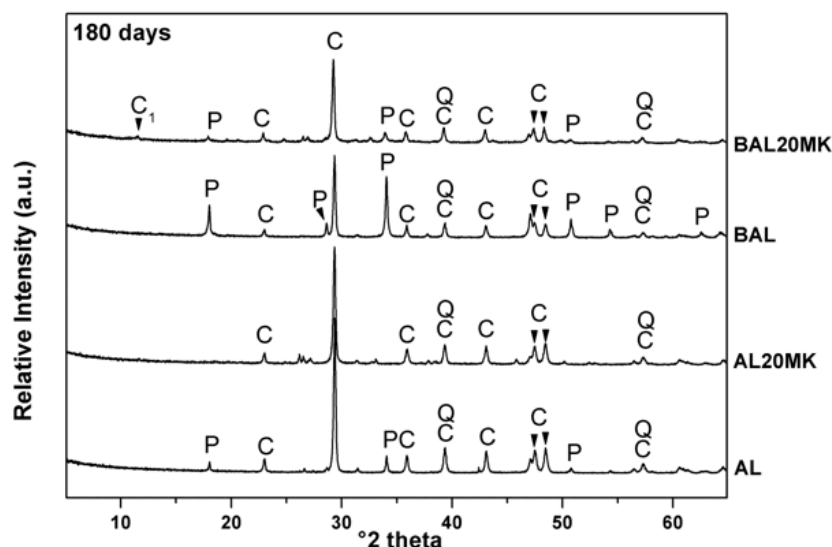


Figura 6.7 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:2, aos 180 dias de cura.

Através da análise de DRX, feita às amostras de argamassas ao traço 1:2, pode-se verificar que, aos 28 dias de cura, os picos de portlandite são de maior intensidade em todas as argamassas. Como acontece com as argamassas ao traço volumétrico 1:3, este pico tem maior destaque nas argamassas BAL e AL, as quais apresentam um processo de carbonatação mais lento, sendo BAL aquela que apresenta o pico de portlandite com maior intensidade.

Devido às reações pozolânicas do metacaulino, as argamassas que o contêm, apresentam picos de maior intensidade do mineral C<sub>1</sub>. O pico de calcite tem maior intensidade para a argamassa BAL20MK, sendo aquela que apresenta uma maior zona carbonatada.

Aos 90 dias de cura, não se verificam quaisquer alterações na estrutura da argamassa AL, resultado este que se encontra em concordância com os valores de carbonatação que também não sofreram qualquer mudança. Em relação às outras argamassas, AL é a que apresenta um pico de calcite de menor intensidade, o que indica que este provete de argamassa é o menos endurecido.

Os picos de C<sub>1</sub>, ao contrário do que se verificou para as argamassas ao traço volumétrico 1:3, aumentaram ligeiramente a sua intensidade, podendo relacionar-se com o aumento da resistência à flexão para estes provetes com 90 dias de cura.

O provete de argamassa AL20MK encontra-se totalmente endurecido ao fim de 180 dias de cura, apresentando esta argamassa o maior pico de calcite e a inexistência de por-

tlandite na sua composição. As restantes argamassas ainda apresentam picos de portlandite, sendo estes mais intensos para BAL, que também apresenta uma zona carbonatada menor, quando comparada com AL e BAL20MK.

Ao contrário do que acontecia para as argamassas ao traço volumétrico 1:3, a argamassa de BAL20MK, aos 180 dias de cura ainda apresenta um pico, embora de pouca intensidade, de  $C_1$ , o mesmo não se observa para a argamassa AL20MK, que não apresenta este mineral na sua composição para esta idade de cura. Considerando os resultados de resistência à flexão obtidos para estes provetes com 180 dias de cura, pode-se verificar que esta aumenta ligeiramente para BAL20MK e diminui para AL20MK.

Pode-se considerar que este tipo de argamassas, ao traço volumétrico 1:2, têm um processo de carbonatação mais lento, quando comparadas com as anteriores (ao traço volumétrico 1:3), sendo que a argamassa BAL é a que apresenta o processo de carbonatação mais lento, como previsto.

### 6.3.2.3 Argamassas com areia de rio ao traço volumétrico 1:2

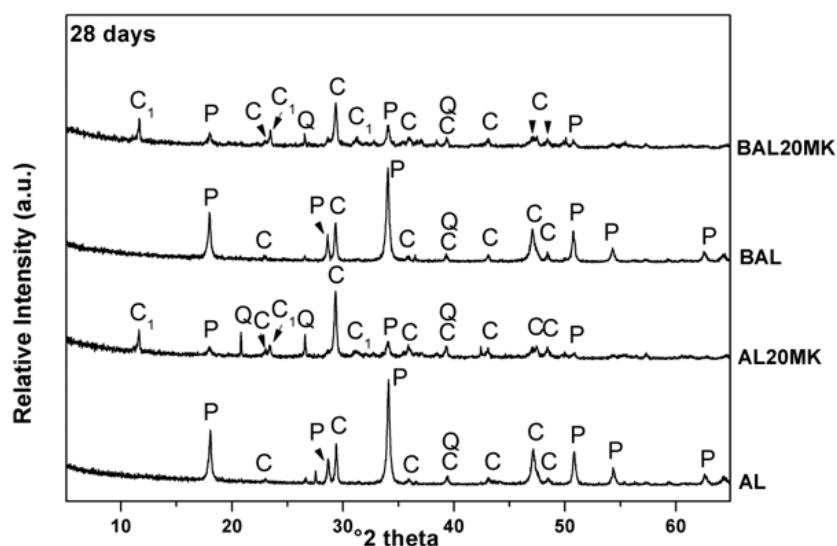


Figura 6.8 - Difração raio-x das argamassas com areia de rio ao traço volumétrico 1:2, aos 28 dias de cura.

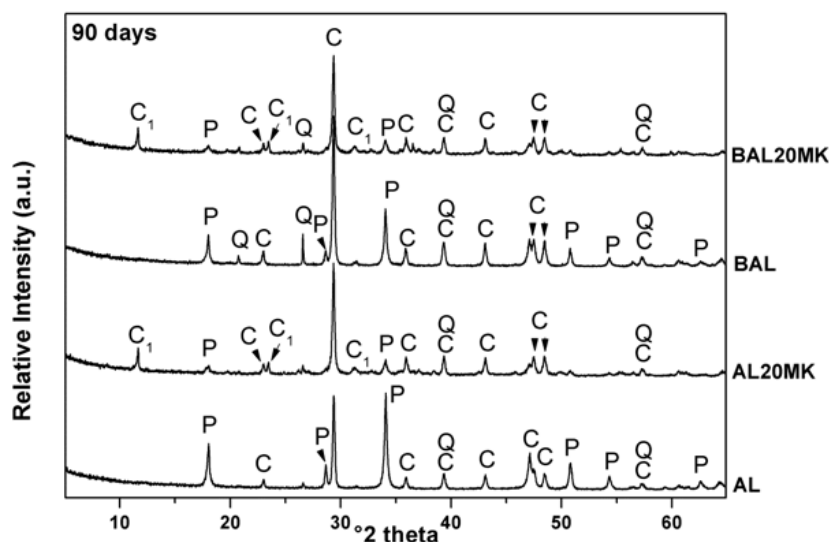


Figura 6.9 - Difração raio-x das argamassas de areia de rio ao traço volumétrico 1:2, aos 90 dias de cura.

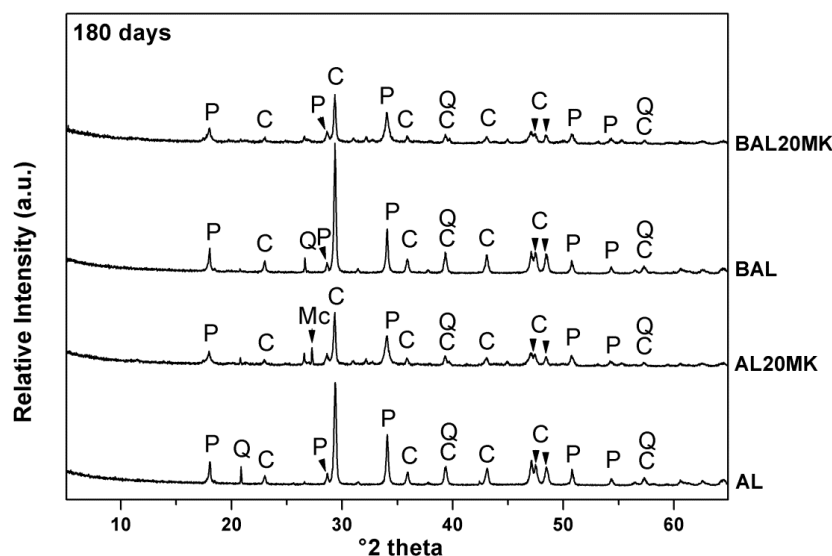


Figura 6.10 - Difração raio-x das argamassas de areia de rio ao traço volumétrico 1:2, aos 180 dias de cura.

Para as argamassas de areia de rio ao traço volumétrico 1:2, a análise de DRX mostra que para os 28 dias de cura, as argamassas AL e BAL são as que apresentam picos de portlandite mais acentuados, sendo este mais intenso para a argamassa BAL, o que traduz menor zona carbonatada quando comparadas com as restantes, como acontecia para as argamassas com a areia calibrada. As argamassas que contêm metacaolino são as que



apresentam na sua composição o mineral pozolânico  $C_1$ , resultado da atividade pozolânica deste ligante (Figura 6.8).

Aos 90 dias de cura, os picos de portlandite diminuem de intensidade em todas as argamassas devido ao seu consumo no processo de carbonatação, no entanto, AL ainda contém um elevado pico de portlandite, sendo esta argamassa a que apresenta menor zona carbonatada.

Verifica-se uma maior intensidade nos picos de calcite (C) em todas as composições de argamassa. Os picos de  $C_1$  nas argamassas AL20MK e BAL20MK mantêm a sua intensidade para esta idade de cura (Figura 6.9).

Aos 180 dias de cura, nenhum provete de argamassa se encontra totalmente endurecido, devido à existência de portlandite nas suas composições. O mineral  $C_1$  não aparece em nenhuma composição de argamassa contendo metacaulino. Para esta idade de cura, os resultados da resistência à flexão são bastante elevados nas argamassas que contêm metacaulino, quando comparados aos resultados das argamassas de areia calibrada ao traço 1:2 e 1:3, isto deve-se à presença de portlandite e calcite na sua estrutura.

Posto isto, pode-se concluir que as argamassas ao traço volumétrico 1:3 têm um processo de endurecimento mais rápido, quando comparadas com as argamassas ao traço volumétrico 1:2. As argamassas ao traço volumétrico 1:2 também apresentam o mineral pozolânico  $C_1$  com picos de maior intensidade.

As argamassas de areia de rio ao traço volumétrico 1:2 consomem mais lentamente o mineral portlandite, e por isso, são as que apresentam um processo de endurecimento mais lento.

#### **6.3.2.4 Argamassas sujeitas ao efeito de sais**

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos por difração raio-x aos 28, 90 e 180 dias de cura, para os provetes de argamassas sujeitos ao ensaio de resistência aos sais.

Onde:

- Q - Quartzo
- P - Portlandite
- C - Calcite
- Hc - Hydrocalumite ( $Ca_4Al_2O_6Cl_2 \cdot 10H_2O$ )

- S - Sodalite  $(K_{7.7}Na_{0.3}(AlSiO_4)_6(ClO_4)_2)$   
H - Halite (NaCl)

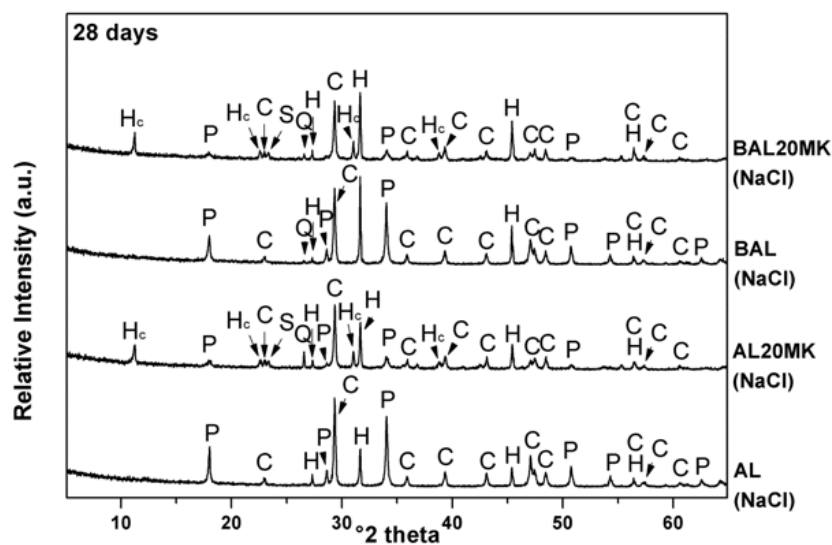


Figura 6.11 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 28 dias de cura.

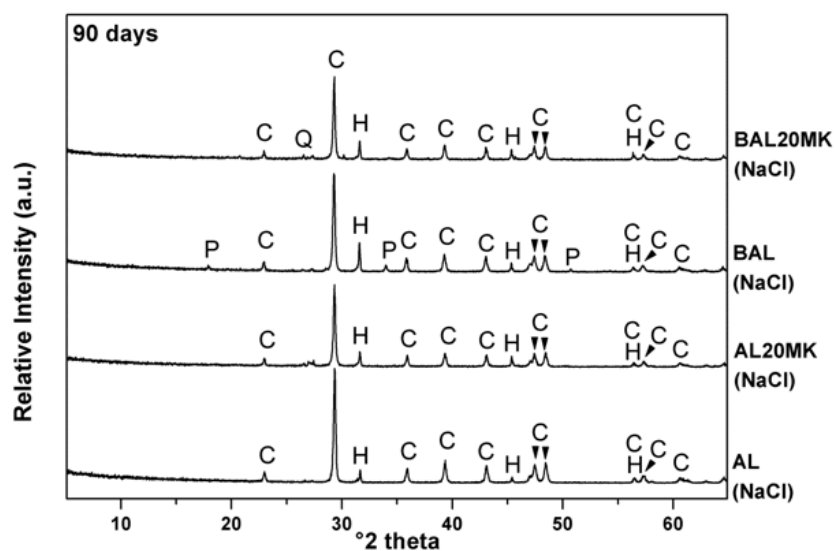


Figura 6.12 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 90 dias de cura.

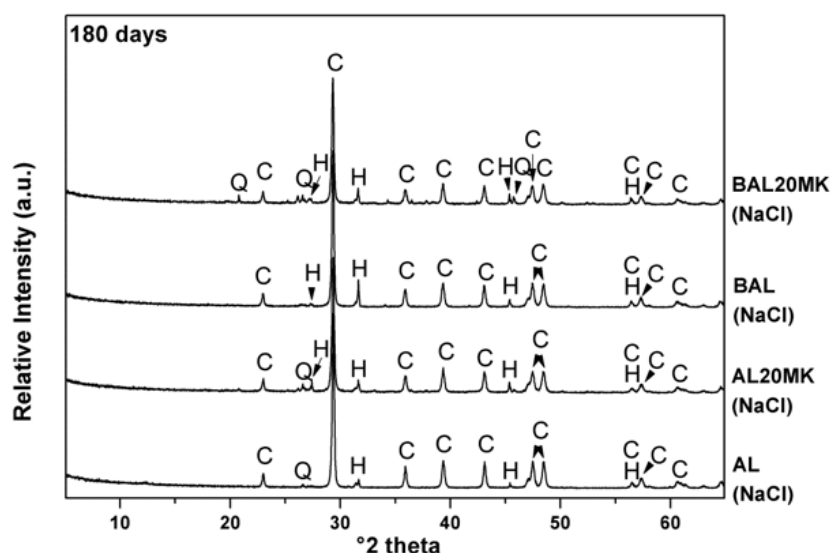


Figura 6.13 - Difração raio-x das argamassas ao traço volumétrico 1:3, aos 180 dias de cura.

Através da análise dos gráficos resultantes da difração raio-x, feita aos provetes sujeitos a uma solução aquosa salina (NaCl), para as argamassas que contêm metacaulino e devido à atividade pozolânica deste aditivo, aos 28 dias de cura, pode-se observar a formação de sais de Friedel (Hc) com os picos caraterísticos aos ( $11.2^{\circ}2\theta$  e  $23.9^{\circ}2\theta$ ), tal facto foi também verificado, por exemplo, por Goñi e Guerrero [24]. Também é possível a observação de sodalite (S), uma nova fase mineral que aparece em vez de  $C_1$  devido à troca catiónica com  $Na^+$ . A esta idade de cura, todas as argamassas contêm na sua estrutura picos de portlandite (P), calcite (C) e também de halite (H) que se formou devido à solução de cloreto de sódio.

Aos 90 dias de cura, os provetes de argamassa com as diferentes composições encontram-se totalmente endurecidos, devido à ausência de portlandite (P) e à existência de elevados picos de calcite na sua estrutura. Os sais de Friedel, devido à sua instabilidade, desapareceram da estrutura das argamassas AL20MK e BAL20MK.

Aos 180 dias de cura, as argamassas AL e BAL, são as que apresentam maior resistência a flexão, sendo que os valores de BAL são mais elevados. Isto pode ser explicado pelos elevados picos de calcite e halite na sua estrutura, em comparação com os das argamassas que contêm metacaulino, onde estes picos não têm tanta intensidade.

## 6.4 ANÁLISE ATRAVÉS DO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARRIMENTO (SEM)

### 6.4.1 Argamassas ao Traço Volumétrico 1:3

As imagens que se seguem são o resultado da análise feita no SEM, onde se pode observar a morfologia das argamassas AL, BAL, AL20MK e BAL20MK aos 28 dias de cura.

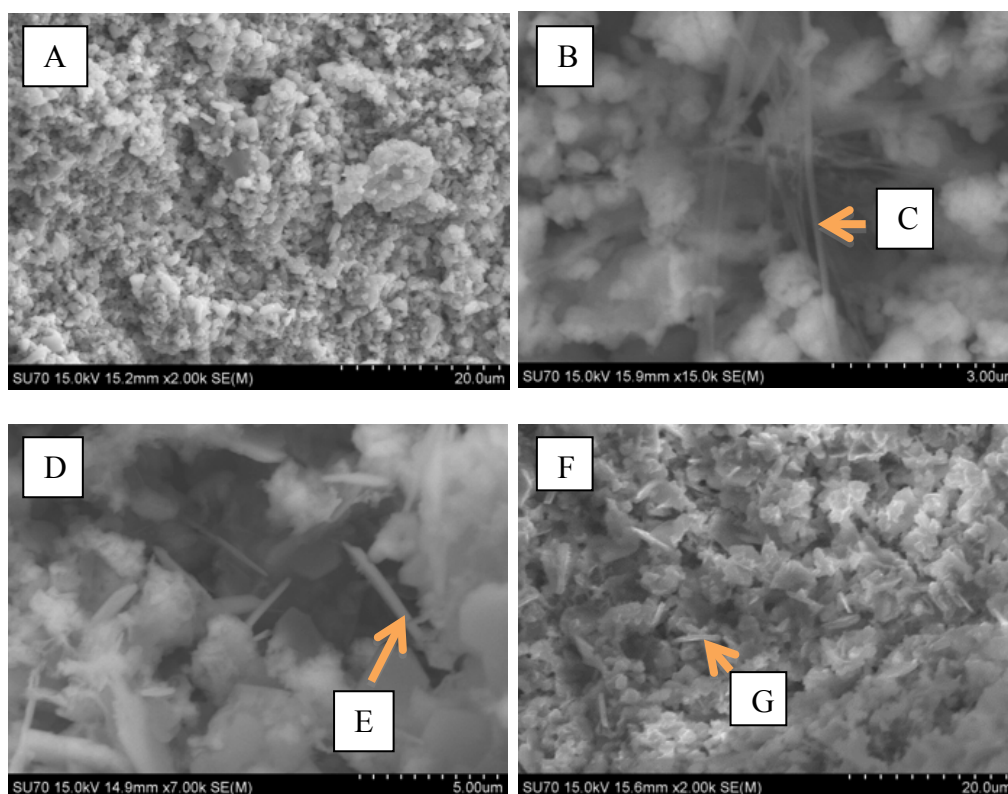


Figura 6.14 - Imagens retiradas do SEM: A – AL; B – BAL; D – AL20MK e F – BAL20MK.

A figura referenciada por A corresponde à matriz calcítica típica da cal.

Em B, observa-se a estrutura morfológica de BAL, onde se verifica atividade pozolânica da bentonite (C), a qual não foi detetada na análise feita através de DRX, logo, pode-se afirmar que esta é realizada a um nível inferior ao metacaulino (Figura 6.15).

A estrutura da argamassa AL20MK está referenciada em D, onde se pode observar partículas em forma de agulha (E), correspondentes a alumino-silicato de cálcio resultante

da atividade pozzolânica do metacaulino (Figura 6.16). Estas partículas também se podem observar na estrutura da argamassa BAL20MK (G), como esta argamassa possui igual percentagem de metacaulino, também foi possível verificar o resultado da atividade pozzolânica deste.

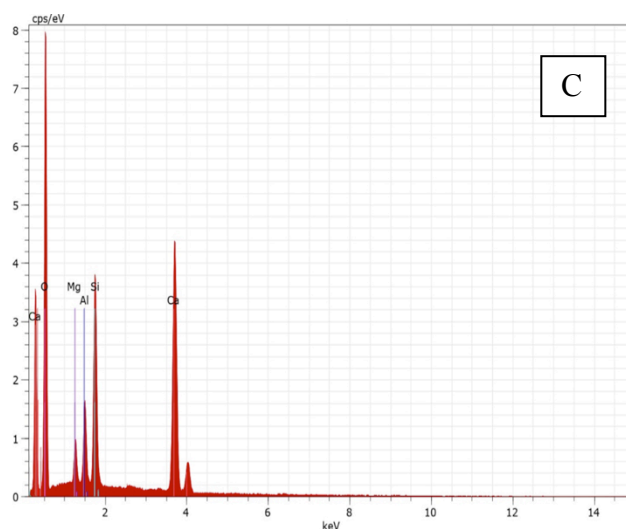


Figura 6.15 - Análise mineralógica da estrutura C assinalada na figura 7.14 – B.

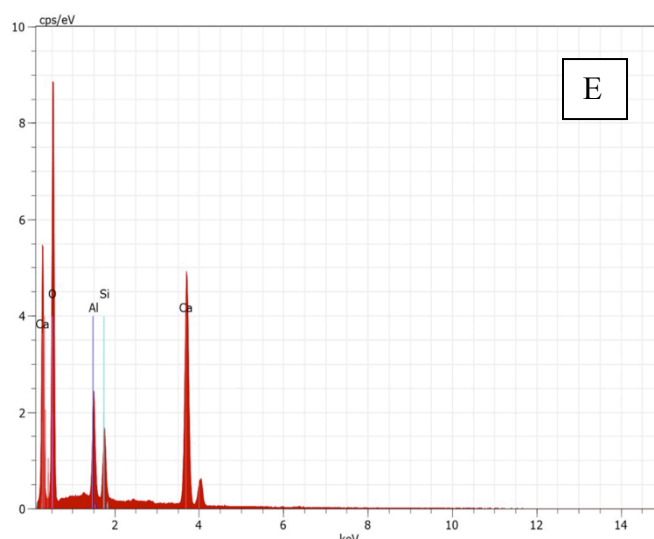


Figura 6.16 - Análise mineralógica da estrutura E assinalada na figura 7.14 – D.

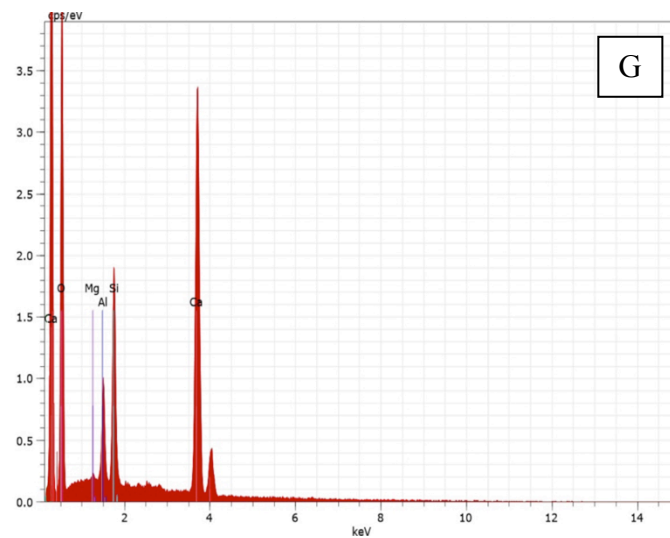
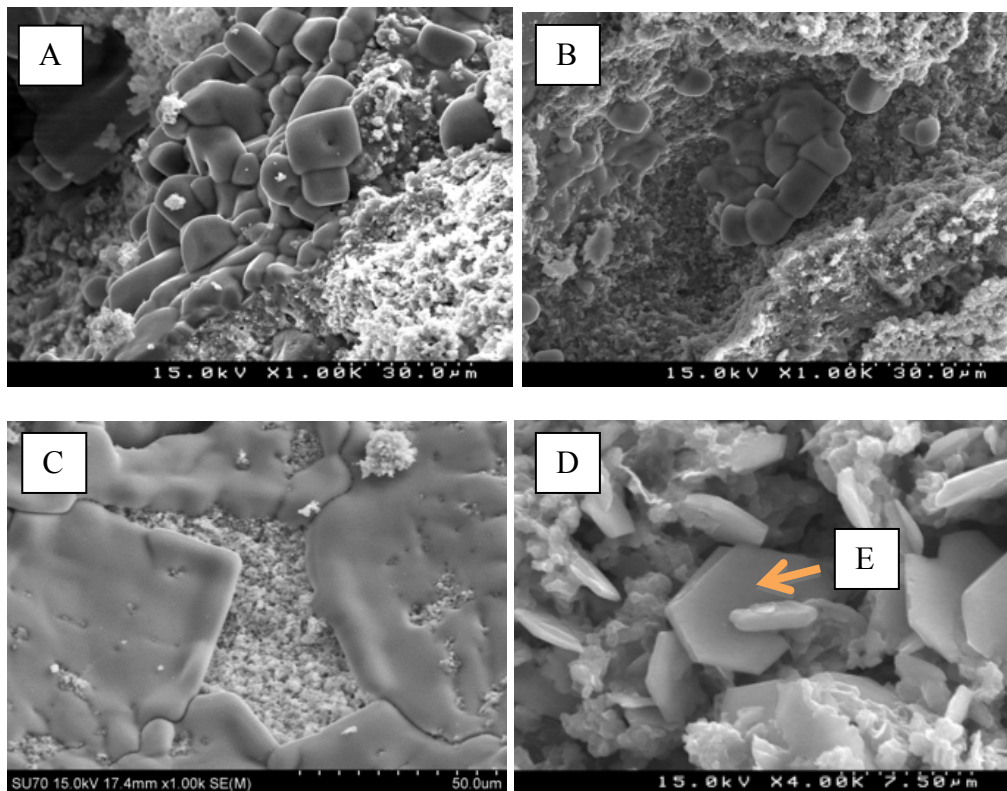


Figura 6.17 - Análise mineralógica da estrutura G assinalada na figura 7.14 – F.

#### 6.4.2 Argamassas ao Traço Volumétrico 1:3 Sujeitas ao Efeito de Sais

A Figura 6.18 apresenta os resultados retirados da análise feita no SEM para as argamassas sujeitas ao efeito de sais (NaCl).



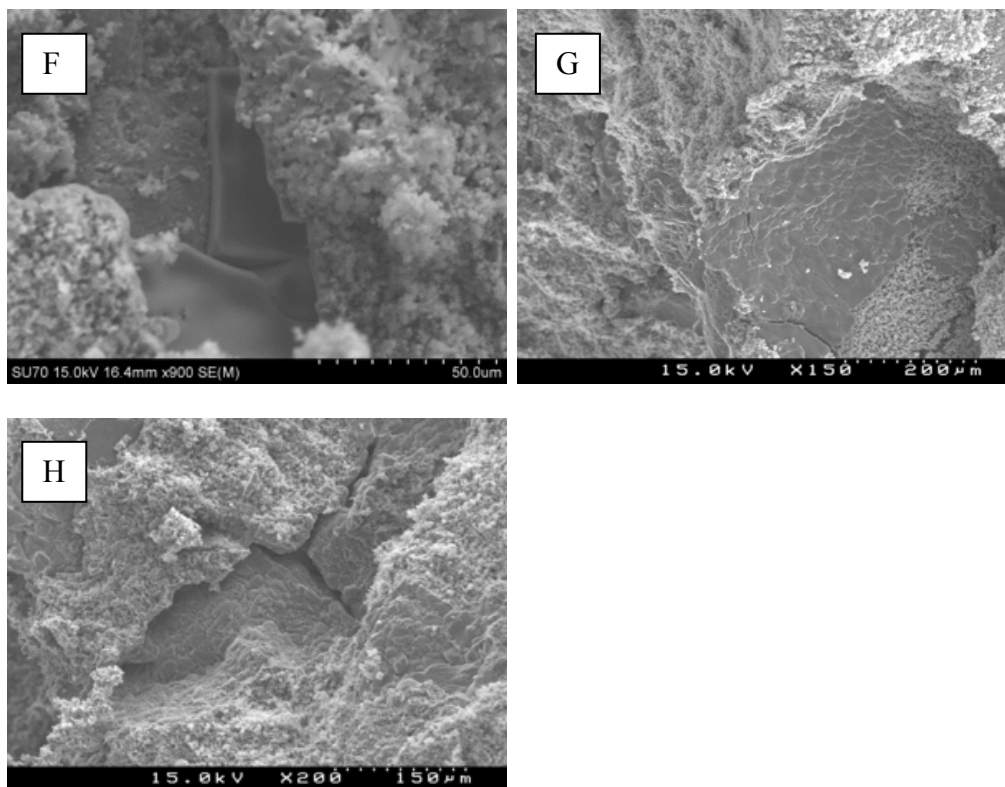


Figura 6.18 - Imagens retiradas do SEM: A – AL; B – BAL; C – BAL; D – AL20MK; F – AL20MK; G – BAL20MK e H – BAL20MK.

Na imagem A podem-se observar cristais de cloreto de sódio (NaCl) na superfície da cal (AL).

Na amostra de BAL (B) verifica-se que os cristais de NaCl preencheram os seus poros, no entanto em C, estes cristais de NaCl assumem uma forma plana na superfície de BAL.

A argamassa AL20MK apresenta cristais hexagonais de hydrocalumite ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), o que provoca vazios na sua estrutura. A imagem F mostra novamente esses cristais depositados nos poros da argamassa.

A imagem G correspondente à argamassa BAL20MK mostra os cristais de NaCl depositados nos seus poros. Os poros de argamassas que contêm metacaulino são menores, o que leva ao aumento de tensões internas. Em H é visível uma fissura.

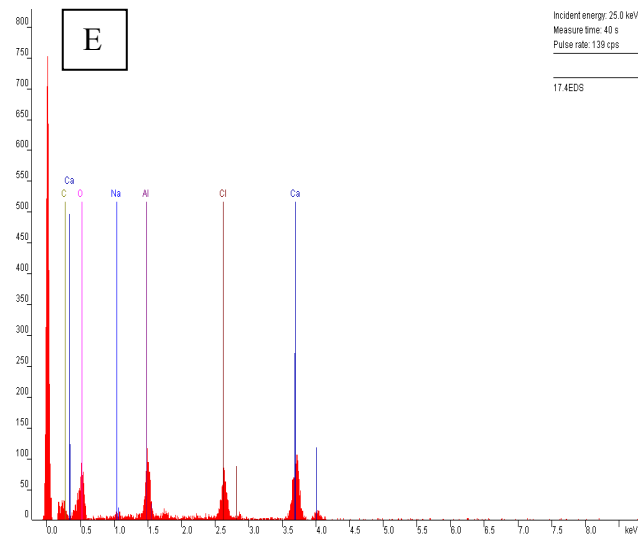


Figura 6.19 - Análise mineralógica da estrutura E assinalada na figura 7.18 – D.

## 6.5 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PROVETES DE ARGAMASSA

### 6.5.1 Considerações Gerais

Neste subcapítulo encontram-se os resultados e respetiva análise dos ensaios mecânicos realizados aos provetes de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura.

Propriedades mecânicas analisadas:

- Resistência à flexão;
- Resistência à compressão;
- Módulo de elasticidade.

### 6.5.2 Resistência à Flexão

Nas figuras seguintes apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão feito aos vários provetes de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura.



### 6.5.2.1 Argamassas ao traço volumétrico 1:3

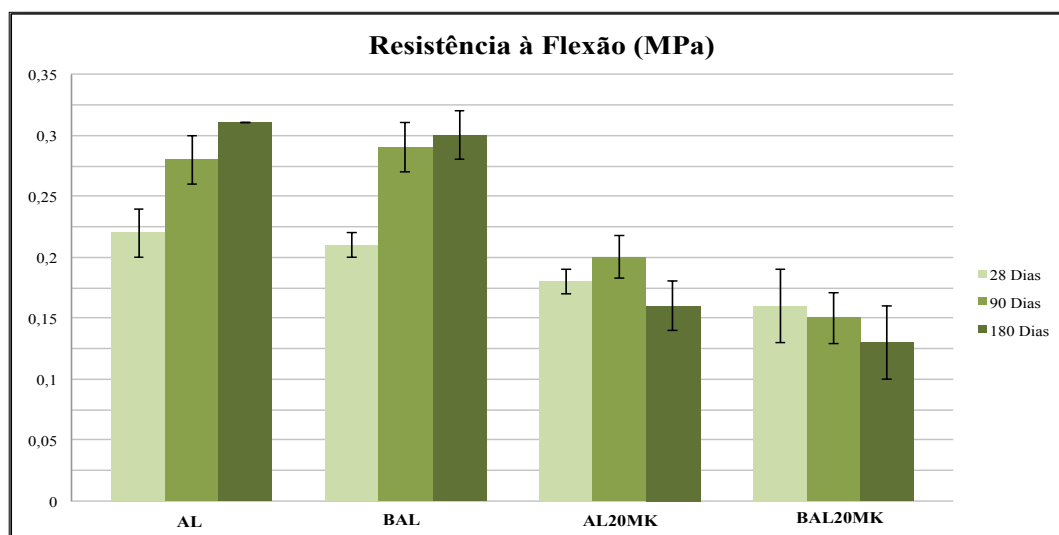


Figura 6.20 - Comparação gráfica dos valores de resistência à flexão das argamassas com traço volumétrico 1:3 para as diferentes idades de cura.

As argamassas AL e BAL apresentam valores de resistência à flexão crescentes ao longo do tempo, sendo as que exibem melhor desempenho. Por comparação com estas argamassas, pode-se afirmar que a incorporação de bentonite e principalmente de metacaulino, nas argamassas ao traço volumétrico 1:3, reduz os valores de resistência à flexão.

A argamassa BAL20MK apresenta um comportamento diferente das restantes argamassas aos 90 dias de cura, podendo afirmar-se que isto se deve ao facto de, a esta idade, esta argamassa ser a única que não contém portlandite na sua estrutura (Figura 6.3).

### 6.5.2.2 Argamassas ao traço volumétrico 1:2

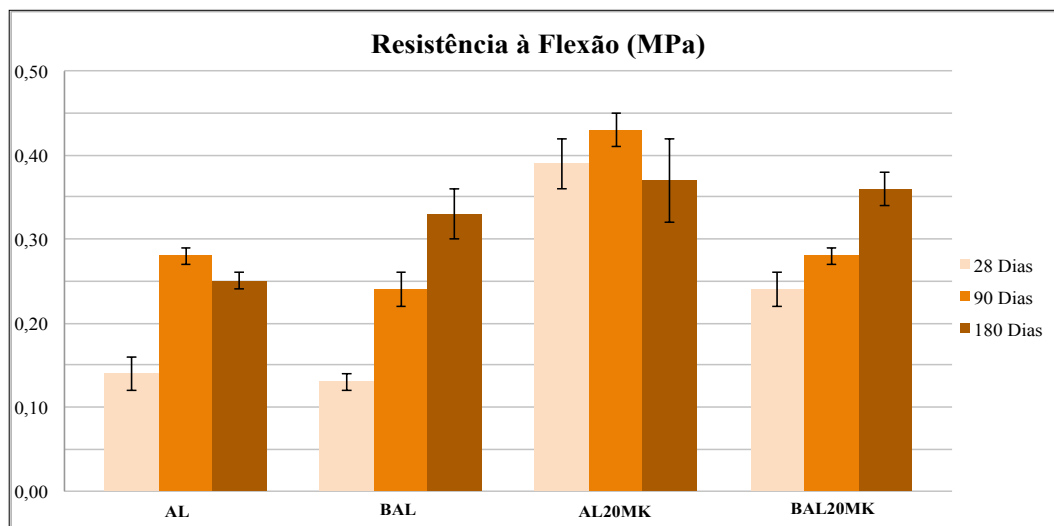


Figura 6.21 - Comparação gráfica dos valores de resistência à flexão das argamassas com traço volumétrico 1:2 para as diferentes idades de cura.

Para as argamassas ao traço 1:2, verifica-se que aquelas que contêm metacaulino aumentam o seu desempenho à flexão, quando comparadas com as argamassas ao traço 1:3. Sendo que as argamassas que contêm bentonite, BAL e BAL20MK, apresentam valores crescentes de resistência à flexão, ao contrário das argamassas AL e AL20MK que apresentam um valor máximo de resistência à flexão aos 90 dias de cura. A argamassa AL20MK é a que apresenta melhor desempenho, mas para os 180 dias de cura, este valor decresce. Isto deve-se ao facto do mineral  $C_1$  ter desaparecido da sua estrutura, no entanto, BAL20MK ainda contém este mineral e também portlandite (P), portanto, a sua resistência aumenta (Figura 6.7).

### 6.5.2.3 Argamassas com areia de rio ao traço 1:2

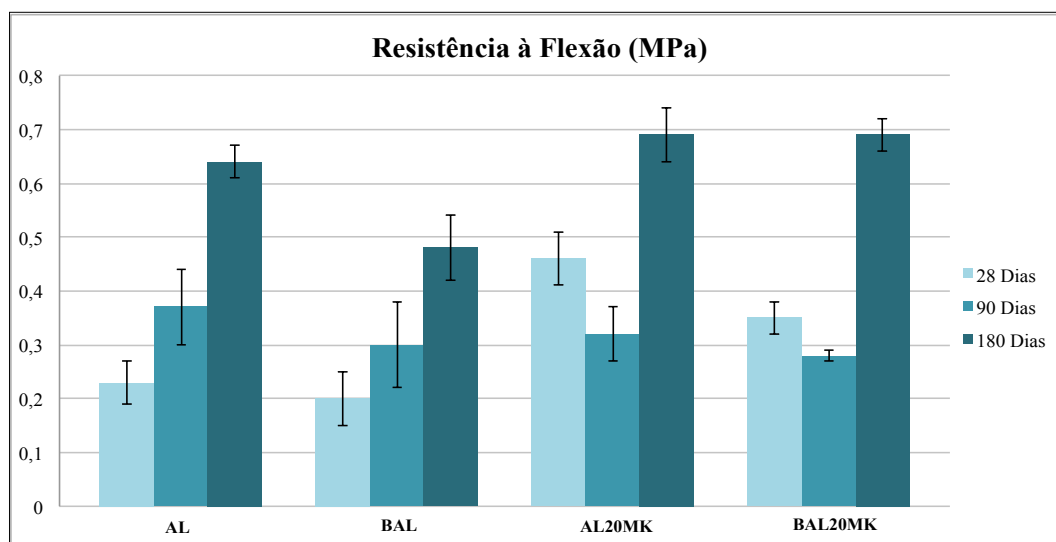


Figura 6.22 - Comparação gráfica dos valores de resistência à flexão das argamassas com areia de rio com traço volumétrico 1:2 para as diferentes idades de cura.

Neste tipo de argamassas, de modo geral, a resistência à flexão melhora significativamente, quando comparadas com as argamassas com areia calibrada.

As argamassas que contêm metacaulino, AL20MK e BAL20MK, são as que apresentam maior valor de resistência à flexão aos 180 dias de cura, sendo que existe um aumento considerável do desempenho à flexão de todas as argamassas a esta idade de cura.

Pode-se afirmar que estes valores mais elevados de resistência à flexão, quando comparados com os das argamassas ao traço volumétrico 1:3, estão relacionados com um menor consumo de portlandite ao longo do tempo, pois ao fim de 180 dias de cura, todas as amostras contêm este mineral na sua estrutura, o que melhora o seu desempenho (Figura 6.10).

#### 6.5.2.4 Argamassas com traço volumétrico 1:3 sujeitas ao efeito de sais

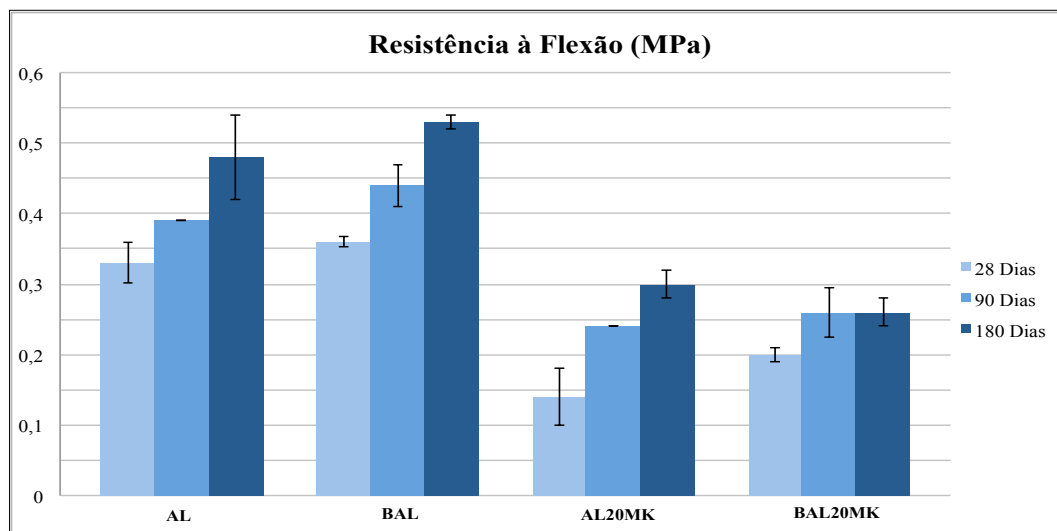


Figura 6.23 - Comparação gráfica dos valores de resistência à flexão das argamassas sujeitas ao efeito de sais (NaCl) para as diferentes idades de cura.

Tal como se verificou nas argamassas ao traço 1:3 “normais”, existe uma evidente redução da resistência à flexão nas argamassas que contêm metacaulino.

Como observado nos resultados da análise no SEM, aos 28 dias de cura, a argamassa AL20MK apresenta cristais hexagonais de hydrocalumite na sua estrutura o que pode explicar a baixa resistência à flexão neste tipo de argamassa. Também a argamassa BAL20MK mostra cristais de NaCl nos seus poros e ainda se pode observar uma fissura, o que explica a baixa resistência à flexão (Figura 6.18-F, Figura 6.18-G e Figura 6.18-H).

A argamassa BAL é a que apresenta maiores valores de resistência à flexão para todas as idades de cura, podendo-se assim afirmar que a bentonite, em ambiente salino, melhora o desempenho à flexão da argamassa.

#### 6.5.3 Resistência à Compressão

Nas figuras seguintes estão representados os comportamentos à compressão dos proveites de argamassa ao longo do tempo.

### 6.5.3.1 Argamassas ao traço volumétrico 1:3

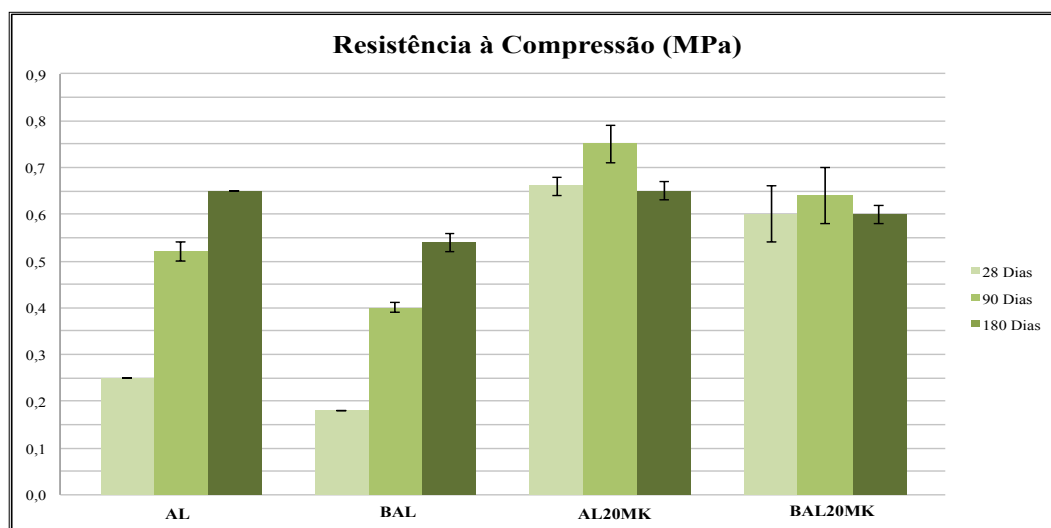


Figura 6.24 - Comparação gráfica dos valores de resistência à compressão das argamassas ao traço volumétrico 1:3 para as diferentes idades de cura.

Pela observação da Figura 6.24, verifica-se um aumento significativo de resistência à compressão ao longo do tempo para as argamassas AL e BAL. A argamassa AL, quando comparada com a argamassa BAL, apresenta maior resistência à compressão, logo, os 5% de bentonite incorporados na argamassa BAL influenciam negativamente a resistência à compressão desta amostra.

As argamassas AL20MK e BAL20MK apresentam um aumento de resistência à compressão aos 90 dias de cura, mas o seu valor decresce aos 180 dias de cura, o que pode estar relacionado com o desaparecimento do mineral  $C_1$  (Figura 6.4). No entanto, estas argamassas, AL20MK e BAL20MK, apresentam valores de resistência mais elevados, quando comparadas com as restantes.

A argamassa AL20MK é a que exhibe maior resistência à compressão, logo, o metacaulino incorporado na amostra confere-lhe maior resistência à compressão e a bentonite faz com que esta diminua, como se pode verificar comparando AL20MK com BAL20MK.

### 6.5.3.2 Argamassas ao traço volumétrico 1:2

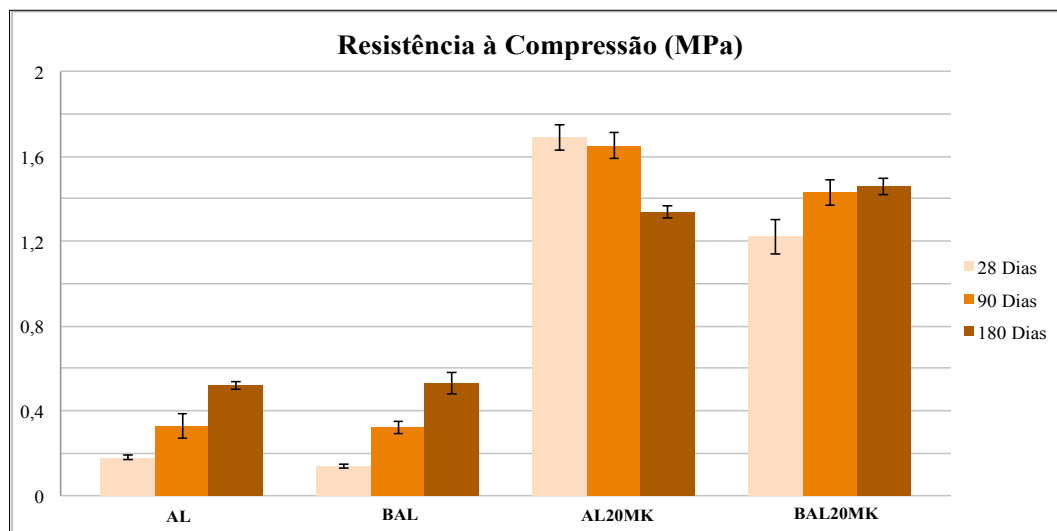


Figura 6.25 - Comparação gráfica dos valores de resistência à compressão das argamassas ao traço volumétrico 1:2 para as diferentes idades de cura.

Pela observação da Figura 6.25, e comparando com as argamassas ao traço volumétrico 1:3, pode-se verificar que a incorporação de 20% de metacaulino, nas amostras ao traço volumétrico 1:2, traduz um aumento considerável de resistência à compressão. Estes valores para a argamassa AL20MK tendem a diminuir ao longo do tempo, sendo este decréscimo maior aos 180 dias, devido ao desaparecimento do mineral  $C_1$  (Figura 6.7). O mesmo não se verifica com a argamassa BAL20MK, para a qual os valores de resistência aumentam ao longo do tempo, sendo esta a argamassa que apresenta o valor de resistência à compressão mais elevado aos 180 dias de cura, estando este valor relacionado com a presença do mineral  $C_1$  e portlandite (P) (Figura 6.7).

Quando comparadas com as argamassas que contêm metacaulino, as argamassas AL e BAL exibem valores mais reduzidos de resistência à compressão. Mesmo havendo um aumento desta ao longo do tempo, estas argamassas são as que apresentam menor resistência.

### 6.5.3.3 Argamassas com areia de rio ao traço 1:2

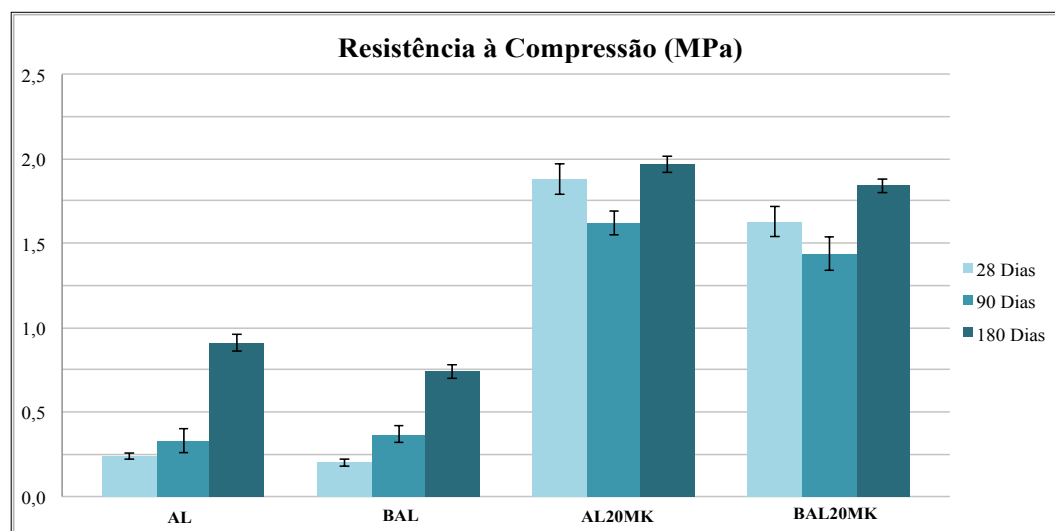


Figura 6.26 - Comparação gráfica dos valores de resistência à compressão das argamassas com areia de rio ao traço volumétrico 1:2 para as diferentes idades de cura.

Tal como as argamassas com areia calibrada ao traço 1:2, as argamassas com areia de rio também apresentam valores de resistência à compressão mais elevados nas argamassas com metacaulino. Estas apresentam comportamento semelhante ao longo do tempo, sendo que a argamassa AL20MK é a que mostra maior resistência à compressão.

Os valores de resistência à compressão, para as argamassas AL e BAL, aumentam ao longo do tempo, no entanto, são consideravelmente mais baixos quando comparados com as restantes argamassas, sendo BAL a argamassa com menor resistência.

Verifica-se que, para todas as argamassas com areia de rio, os seus valores de resistência à compressão aos 180 dias de cura são mais elevados, quando comparados com os valores das argamassas com areia calibrada, devido a ainda existir portlandite na sua estrutura que permite a carbonatação, aumentando assim a resistência à compressão das amostras. No entanto, nestas argamassas a bentonite não garante melhor desempenho.

#### 6.5.3.4 Argamassas com traço volumétrico 1:3 sujeitas ao efeito de sais

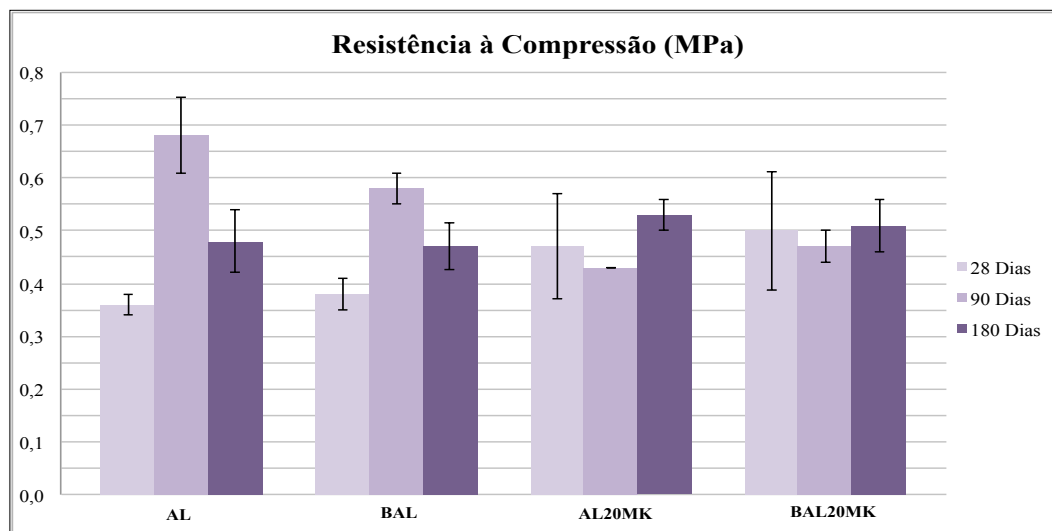


Figura 6.27 - Comparação gráfica dos valores de resistência à compressão das argamassas sujeitas ao efeito de sais (NaCl) para as diferentes idades de cura.

Após o ensaio de resistência aos sais, as argamassas AL e BAL apresentam maior resistência à compressão aos 28 e 90 dias de cura quando comparadas com as argamassas que não sofreram “ataque salino”, no entanto, para os 180 dias este valor diminui.

As argamassas AL20MK e BAL20MK apresentam valores mais elevados de resistência à compressão aos 180 dias de cura, sendo que os seus valores mais baixos ocorrem aos 90 dias de cura.

No geral, os valores de resistência à compressão de todas as argamassas, aos 180 dias de cura, são muito próximos.

#### 6.5.4 Módulo de Elasticidade

Seguidamente pode-se verificar a evolução do módulo de elasticidade dinâmico para as diferentes argamassas, ao longo do tempo.



#### 6.5.4.1 Argamassas ao traço volumétrico 1:3

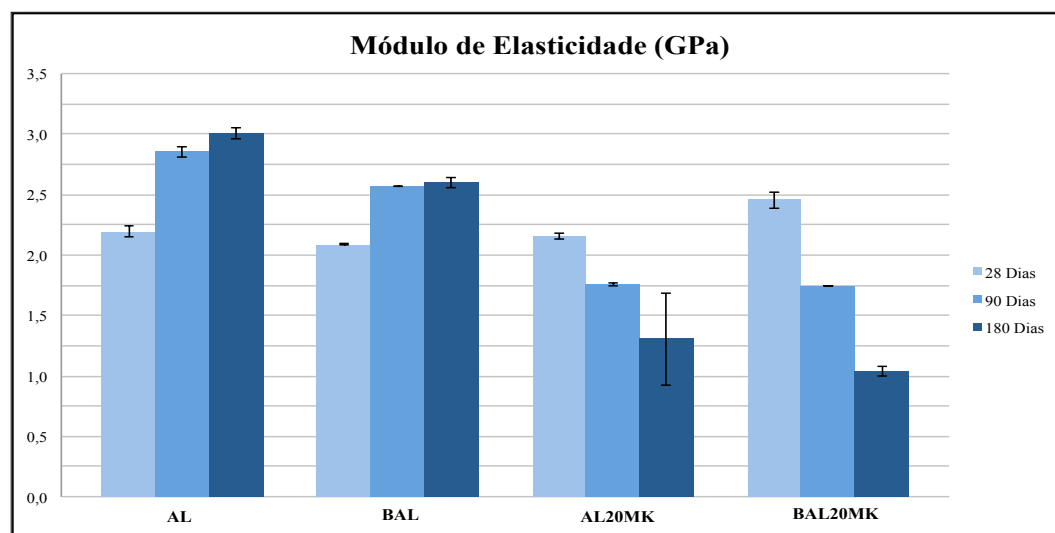


Figura 6.28 - Comparação gráfica dos valores do módulo de elasticidade das argamassas ao traço volumétrico 1:3 para as diferentes idades de cura.

Para os provetes de argamassa ao traço volumétrico 1:3, observa-se que a argamassa BAL20MK é a que apresenta maior módulo de elasticidade aos 28 dias de cura, no entanto, o seu módulo de elasticidade vai diminuindo consideravelmente ao longo do tempo, sendo esta a argamassa com o módulo de elasticidade mais baixo aos 180 dias de cura.

As argamassas que contêm metacaulino na sua composição, AL20MK e BAL20MK, são as que apresentam valores decrescentes de módulo de elasticidade ao longo do tempo. Já AL e BAL apresentam valores crescentes, sendo AL a argamassa com o módulo de elasticidade mais elevado aos 180 dias de cura.

#### 6.5.4.2 Argamassas ao traço volumétrico 1:2

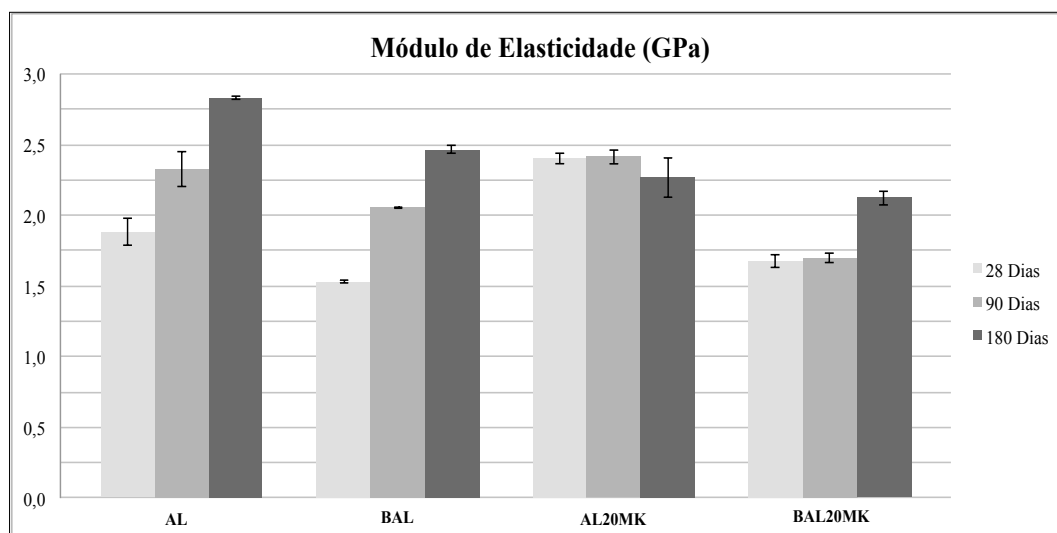


Figura 6.29 - Comparação gráfica dos valores do módulo de elasticidade das argamassas ao traço volumétrico 1:2 para as diferentes idades de cura.

Nos provetes de argamassa ao traço volumétrico 1:2, para as argamassas AL e BAL verifica-se a mesma tendência das argamassas ao traço volumétrico 1:3, de valor crescente do módulo de elasticidade ao longo do tempo, sendo que, o aumento destes valores dos 90 para os 180 dias de cura é mais acentuado, e leva a que a argamassa AL, apresente o maior valor de módulo de elasticidade ao fim de 180 dias de cura.

No entanto, as argamassas que contêm metacaulino não apresentam o mesmo comportamento quando comparadas com as anteriores (argamassas ao traço volumétrico 1:3).

O módulo de elasticidade da argamassa AL20MK tem o mesmo valor aos 28 e 90 dias de cura, sendo esta argamassa a que apresenta maior módulo de elasticidade para estas idades de cura.

A argamassa BAL20MK é a que apresenta menores valores de módulo de elasticidade aos 90 e 180 dias de cura, quando comparada com os restantes tipos de argamassa. Aos 28 dias de cura o seu módulo de elasticidade é ligeiramente superior ao da argamassa BAL, que tem o menor valor de módulo de elasticidade para esta idade de cura.

### 6.5.4.3 Argamassas com areia de rio ao traço 1:2

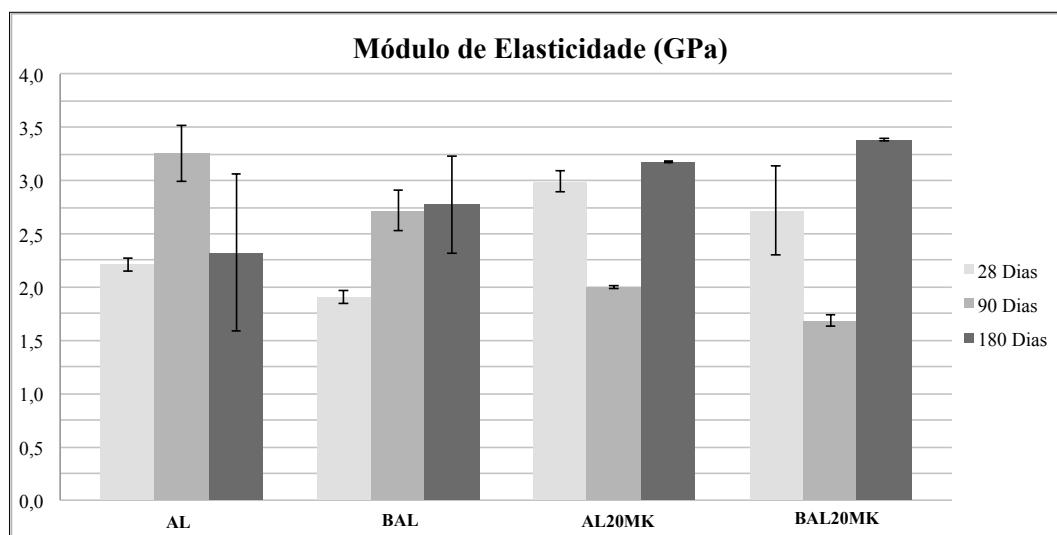


Figura 6.30 - Comparação gráfica dos valores de módulo de elasticidade das argamassas com areia de rio ao traço volumétrico 1:2 para as diferentes idades de cura.

Pela observação da Figura 6.30, pode-se verificar que ao contrário do obtido para as argamassas de areia calibrada, o módulo de elasticidade, aos 28 dias de cura, é mais elevado para as argamassas que contêm metacaulino, sendo o seu valor maior para a argamassa AL20MK.

Aos 90 dias de cura, os valores do módulo de elasticidade diminuem consideravelmente nas argamassas AL20MK e BAL20MK. O mesmo não se verifica para as argamassas AL e BAL, para as quais, a este tempo de cura, os valores de módulo de elasticidade aumentam.

Verifica-se um aumento acentuado dos valores do módulo de elasticidade nas argamassas que contêm metacaulino aos 180 dias de cura e também, ainda que ligeiro, para a argamassa BAL. Ao contrário do que acontece com a argamassa AL, para a qual se verifica um decréscimo acentuado deste valor.

### 6.5.5 Considerações Finais

Sendo assim, e através da análise mecânica aos provetes de argamassa, pode-se afirmar que as argamassas AL e BAL, ao traço volumétrico 1:3, apresentam maior módulo de

elasticidade e resistência à flexão, quando comparadas com as argamassas que contêm metacaulino, no entanto, este aditivo melhora a sua resistência à compressão. De um modo geral, a resistência mecânica das argamassas ao traço 1:3 de volume, que contêm metacaulino, reduzem o seu desempenho aos 180 dias de cura, podendo este facto estar relacionado com a ausência do mineral pozolânico ( $C_1$ ), resultante da atividade pozolânica do metacaulino.

Em ambiente salino, a incorporação de 5% de bentonite na argamassa (BAL) melhora o desempenho desta à flexão. Também se pode considerar que este tipo de ambiente diminui, ainda que de forma pouco acentuada, a resistência à compressão das argamassas, AL, AL20MK e BAL20MK, quando comparadas com as argamassas que não foram sujeitas a este processo.

As argamassas com traço volumétrico 1:2, tanto com areia calibrada como com areia de rio, apresentam resultados de módulo de elasticidade superiores aos das amostras com traço 1:3, o mesmo acontece com os valores de resistência à flexão. Quanto à resistência à compressão, as argamassas apresentam melhor desempenho quando contêm metacaulino.

No entanto, as argamassas com areia de rio ao traço 1:2 de volume, no geral, são as que exibem melhor comportamento mecânico, estando este resultado de acordo com a análise mineralógica através de DRX, onde todas as amostras, ao fim de 180 dias, apresentam portlandite na sua estrutura.

## **6.6 AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO**

### **6.6.1 Considerações Gerais**

Os resultados do processo de carbonatação de cada amostra de argamassa para os proveitos, blocos de adobe e parede de adobe, aos 28, 90 e 180 dias de cura, apresentam-se a seguir.

## 6.6.2 Provetes de Argamassa

### 6.6.2.1 Argamassas ao traço volumétrico 1:3

Tabela 6.3 - Percentagens de carbonatação

Tempo de Cura (dias)	Argamassa	Carbonatação (%)
28	AL	36
	BAL	23
	AL20MK	36
	BAL20MK	51
90	AL	84
	BAL	80
	AL20MK	91
	BAL20MK	100
180	AL	100
	BAL	100
	AL20MK	100
	BAL20MK	100

Através da análise da Tabela 6.3, pode-se verificar que a argamassa que contém 5% de bentonite na sua composição (BAL) é a que apresenta um processo de carbonatação mais lento, este facto deve-se à existência de picos mais intensos, quando comparados com as restantes argamassas, de portlandite na sua estrutura (Figura 6.2 e Figura 6.3). Pode-se afirmar, também, que as argamassas AL20MK e BAL20MK são as que exibem maiores percentagens de carbonatação nas diferentes idades de cura, podendo, por isso, considerar-se que o metacaulino acelera o processo de carbonatação. Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos através da análise DRX, onde as argamassas que contêm metacaulino exibem um consumo de portlandite mais rápido (Figura 6.2 e Figura 6.3).

Aos 180 dias de cura, todos os provetes de argamassa se encontram completamente carbonatados, ou seja, estão totalmente endurecidos, no entanto, segundo a análise DRX, nas argamassas AL e BAL ainda é possível observar-se a presença de pequenos picos de portlandite, que pela avaliação da carbonatação se podem considerar insignificantes (Figura 6.4).

**6.6.2.2 Argamassas ao traço volumétrico 1:2**

Tabela 6.4 - Percentagens de carbonatação

Tempo de Cura (dias)	Argamassa	Carbonatação (%)
28	AL	28
	BAL	19
	AL20MK	36
	BAL20MK	44
90	AL	28
	BAL	75
	AL20MK	58
	BAL20MK	61
180	AL	94
	BAL	75
	AL20MK	100
	BAL20MK	84

Quanto à análise do processo de carbonatação das argamassas ao traço 1:2 de volume, verifica-se que aos 28 dias de cura, a argamassa BAL é a que apresenta menor zona carbonatada, no entanto, aos 90 dias de cura, esta passa a ser a argamassa com maior percentagem de carbonatação. Segundo a análise DRX, esta argamassa é a que apresenta um consumo de portlandite mais lento (Figura 6.5e Figura 6.6).

Aos 180 dias de cura, apenas a argamassa AL20MK completou o seu processo de carbonatação, tal como verificado na análise DRX, onde esta argamassa não apresenta qualquer pico de portlandite na sua estrutura (Figura 6.7). As argamassas BAL e BAL20MK são as menos carbonatadas a esta idade de cura. Pode então afirmar-se que a incorporação de bentonite em argamassas ao traço 1:2 de volume, atrasa o seu processo de carbonatação.

### 6.6.2.3 Argamassas com areia de rio ao traço 1:2

Tabela 6.5 - Percentagens de carbonatação

Tempo de Cura (dias)	Argamassa	Carbonatação (%)
28	AL	28
	BAL	19
	AL20MK	44
	BAL20MK	28
90	AL	53
	BAL	61
	AL20MK	75
	BAL20MK	70
180	AL	84
	BAL	88
	AL20MK	75
	BAL20MK	75

As argamassas com areia de rio com traço volumétrico 1:2 não apresentam um processo de carbonatação linear.

Aos 28 dias de cura, a argamassa BAL é a que exibe menor percentagem de carbonatação, sendo que estes valores vão aumentando, e aos 180 dias de cura esta argamassa é a mais carbonatada. E ao contrário do que acontecia com as argamassas com areia calibrada, aos 180 dias de cura, as argamassas que contêm metacaulino são as que apresentam menor zona carbonatada. No entanto, nenhuma das argamassas apresenta um processo de carbonatação completo aos 180 dias de cura, tal como já se verificou anteriormente, a presença de portlandite nas amostras, com esta idade de cura, é a responsável por os provetes não estarem totalmente endurecidos (Figura 6.10).

### 6.6.3 Blocos de Adobe

#### 6.6.3.1 Argamassas ao traço volumétrico 1:3

Tabela 6.6 - Estado de carbonatação das argamassas em blocos de adobe para as diferentes idades de cura.

Tempo de Cura	Amostra	Tipo de camada	Carbonatação (%)
30 Dias	AL	2 camadas	15
		1 camada	35
		2 camadas (ch)	35
	BAL	2 camadas	10
		1 camada	25
		2 camadas (ch)	25
	AL20MK	2 camadas	20
		1 camada	43
		2 camadas (ch)	35
	BAL20MK	2 camadas	10
		1 camada	35
		2 camadas (ch)	35
60 Dias	AL	2 camadas	30
		1 camada	55
		2 camadas (ch)	45
	BAL	2 camadas	23
		1 camada	45
		2 camadas (ch)	35
	AL20MK	2 camadas	25
		1 camada	100
		2 camadas (ch)	100
	BAL20MK	2 camadas	28
		1 camada	60
		2 camadas (ch)	65
90 Dias	AL	2 camadas	35
		1 camada	100
		2 camadas (ch)	100
	BAL	2 camadas	23
		1 camada	45
		2 camadas (ch)	45
	AL20MK	2 camadas	45
		1 camada	100
		2 camadas (ch)	100
	BAL20MK	2 camadas	30
		1 camada	100
		2 camadas (ch)	100



Através da análise da Tabela 6.6 que representa o processo de carbonatação das argamassas em blocos de adobe, pode-se verificar que a argamassa que contém 5% de bentonite na sua composição (BAL) é a que apresenta um processo mais lento, tal como se verificou nos provetes de argamassa. Aos 90 dias de cura, esta argamassa não apresenta um processo de carbonatação completo em nenhum tipo de camada.

De um modo geral, as percentagens de carbonatação foram menores nas argamassas colocadas em duas camadas (2x2 cm), sendo que após 90 dias de cura, nenhuma destas argamassas estava completamente carbonatada. Também se verificou que as argamassas que contêm bentonite são as que apresentam um processo de carbonatação mais lento, como o pretendido.

#### 6.6.4 Parede de Adobe

##### 6.6.4.1 Argamassas ao traço volumétrico 1:3

Tabela 6.7 - Estado de carbonatação das argamassas na parede de adobe para as diferentes idades de cura.

Tempo de Cura	Amostra	Carbonatação (%)
30 Dias	AL	35
	BAL	35
	AL20MK	55
	BAL20MK	55
60 Dias	AL	65
	BAL	60
	AL20MK	100
	BAL20MK	100
90 Dias	AL	100
	BAL	100
	AL20MK	100
	BAL20MK	100

Como verificado para os provetes de argamassa e para as argamassas em blocos de adobe, também na parede de adobe a argamassa que apresenta um processo de carbonatação mais lento é a argamassa BAL. No entanto, todas as argamassas na parede de adobe estão completamente carbonatadas aos 90 dias de cura. Pode-se considerar que as condições, em ambiente laboratorial, onde se encontrava a parede de adobe, podem ter contribuído para acelerar o processo de carbonatação.

#### 6.6.4.2 Argamassas ao traço volumétrico 1:2

Tabela 6.8 - Estado de carbonatação das argamassas na parede de adobe para as diferentes idades de cura.

Tempo de Cura	Amostra	Carbonatação (%)
30 Dias	AL	25
	BAL	15
	AL20MK	40
	BAL20MK	20
60 Dias	AL	50
	BAL	35
	AL20MK	50
	BAL20MK	40
90 Dias	AL	100
	BAL	60
	AL20MK	85
	BAL20MK	75

Verifica-se pela Tabela 6.8, que a incorporação de 5% de bentonite, nas argamassas com traço 1:2 de volume, atrasa o seu processo de carbonatação, tal como verificado anteriormente para os provetes com essa composição.

## 6.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

### 6.7.1 Considerações Gerais

O que se pretende de uma argamassa de revestimento é que esta absorva água de forma lenta e que a sua secagem seja rápida.

Neste subcapítulo estão representados os resultados da capacidade de absorção de água e de secagem dos diferentes tipos de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura.

### 6.7.2 Provetes de Argamassa

#### 6.7.2.1 Argamassas ao traço volumétrico 1:3

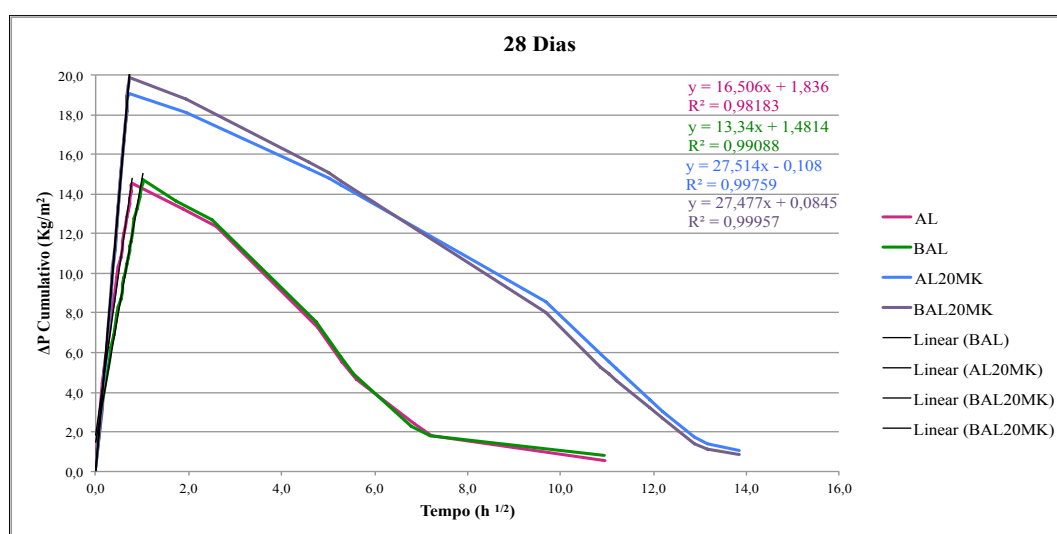


Figura 6.31 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 28 dias.

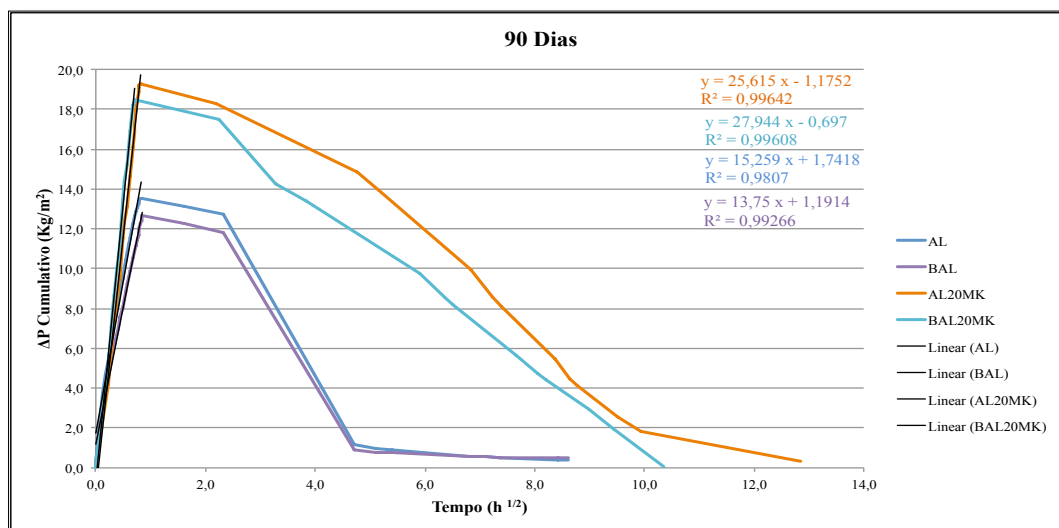


Figura 6.32 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 90 dias.

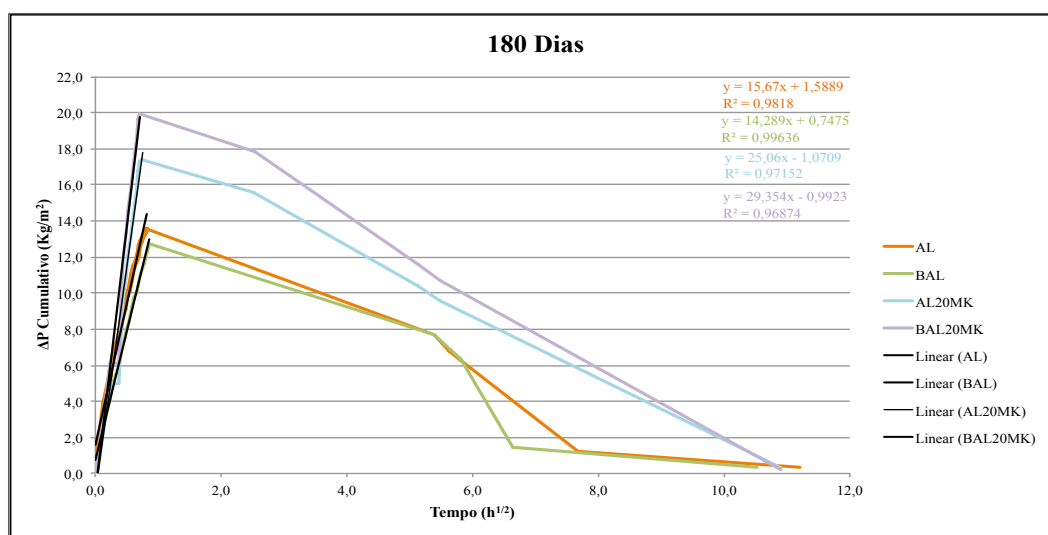


Figura 6.33 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 90 dias.

Tabela 6.9 - Coeficientes de capilaridade dos provetes de argamassa.

Tempo de Cura	Argamassa	Coefficiente de Capilaridade ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ )
28 Dias	AL	16,506
	BAL	13,340
	AL20MK	27,514
	BAL20MK	27,477
90 Dias	AL	15,259
	BAL	13,750
	AL20MK	25,615
	BAL20MK	27,944
180 Dias	AL	15,670
	BAL	14,289
	AL20MK	25,060
	BAL20MK	29,354

Avaliando os resultados apresentados para os provetes de argamassa ao traço 1:3, pode-se verificar que a incorporação de 5% de bentonite na composição das argamassas melhora o seu comportamento, no que diz respeito à absorção de água por capilaridade, sendo esta argamassa, BAL, a que apresenta coeficientes de capilaridade mais baixos para as diferentes idades de cura.

Quando comparadas com as argamassas que contêm metacaulino, também se verifica que AL e BAL apresentam um tempo de secagem mais rápido.

### 6.7.2.2 Argamassas ao traço volumétrico 1:2

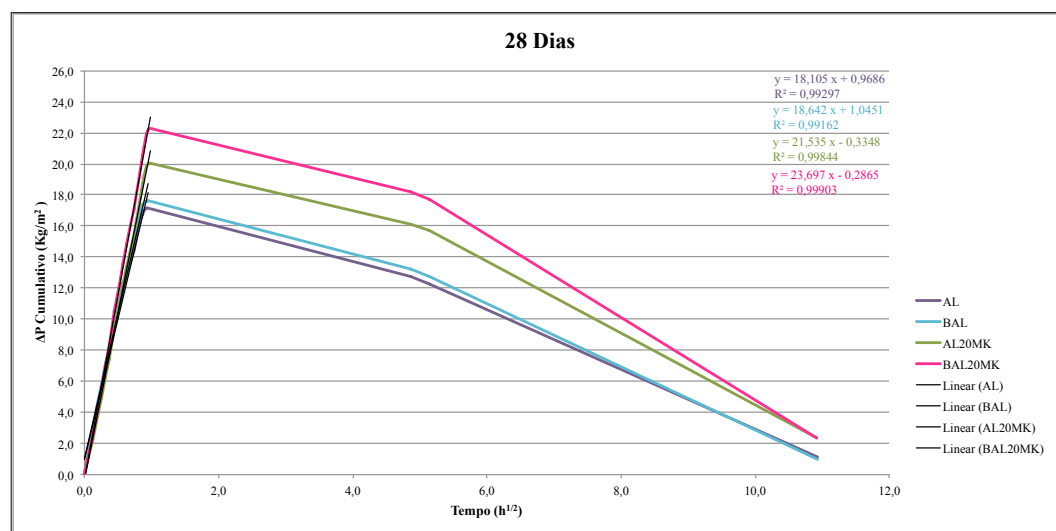


Figura 6.34 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 28 dias.

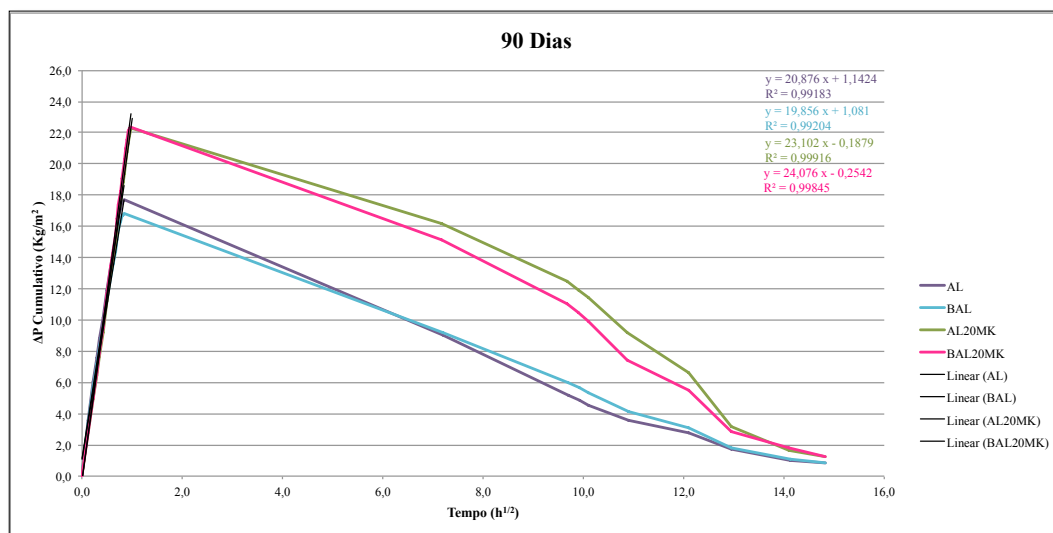


Figura 6.35 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 90 dias.

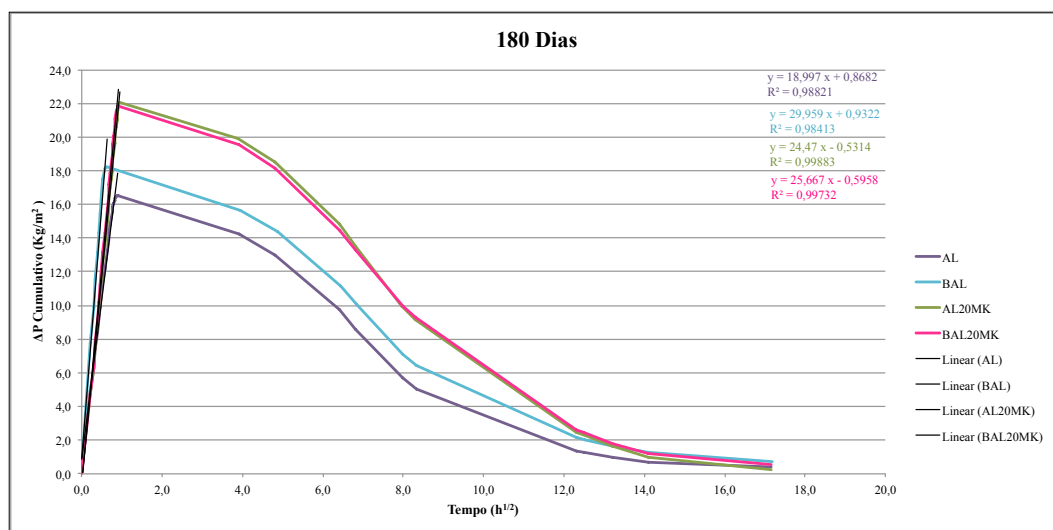


Figura 6.36 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 180 dias.

Tabela 6.10 - Coeficientes de capilaridade dos provetes de argamassa.

Tempo de Cura	Argamassa	Coeficiente de Capilaridade ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ )
28 Dias	AL	18,105
	BAL	18,642
	AL20MK	21,535
	BAL20MK	23,697
90 Dias	AL	20,876
	BAL	19,856
	AL20MK	23,102
	BAL20MK	24,076
180 Dias	AL	18,997
	BAL	29,959
	AL20MK	24,470
	BAL20MK	25,667

Através da análise das figuras e da tabela anteriores, verifica-se que, também para as argamassas ao traço volumétrico 1:2, as que incorporam metacaulino apresentam coeficientes de capilaridade mais altos quando comparadas a AL e BAL e tempo de secagem mais lento.

No entanto, para as argamassas com este rácio, a argamassa AL é a que apresenta melhor comportamento ao longo do tempo, apesar da argamassa BAL também apresentar um comportamento muito semelhante.

### 6.7.2.3 Argamassas com areia de rio ao traço 1:2

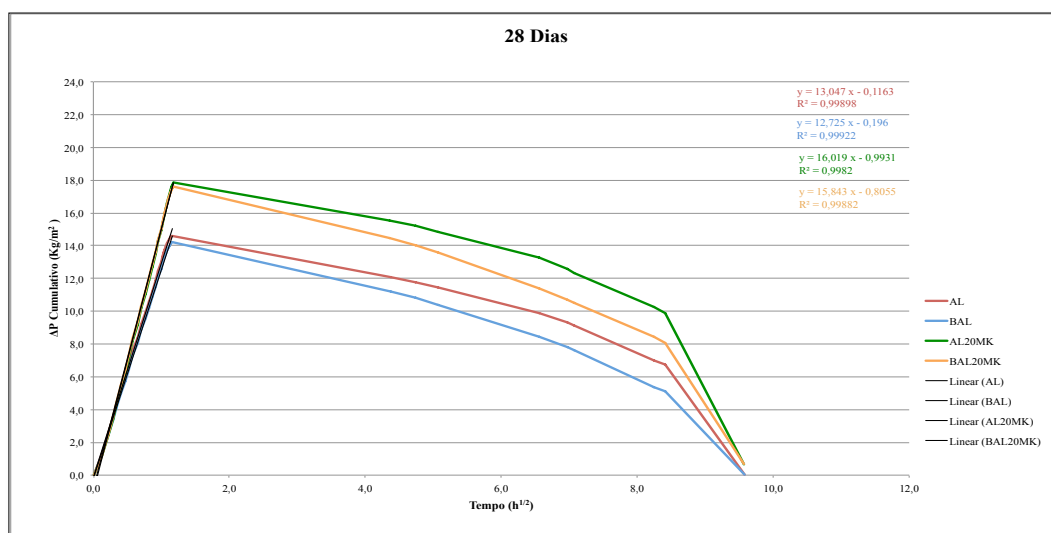


Figura 6.37 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 28 dias.

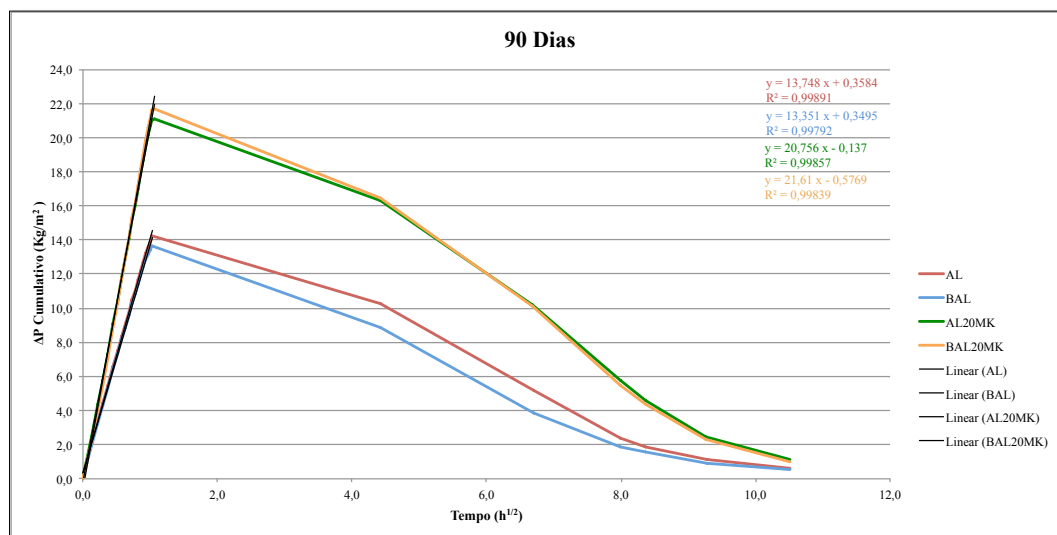


Figura 6.38 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 90 dias.

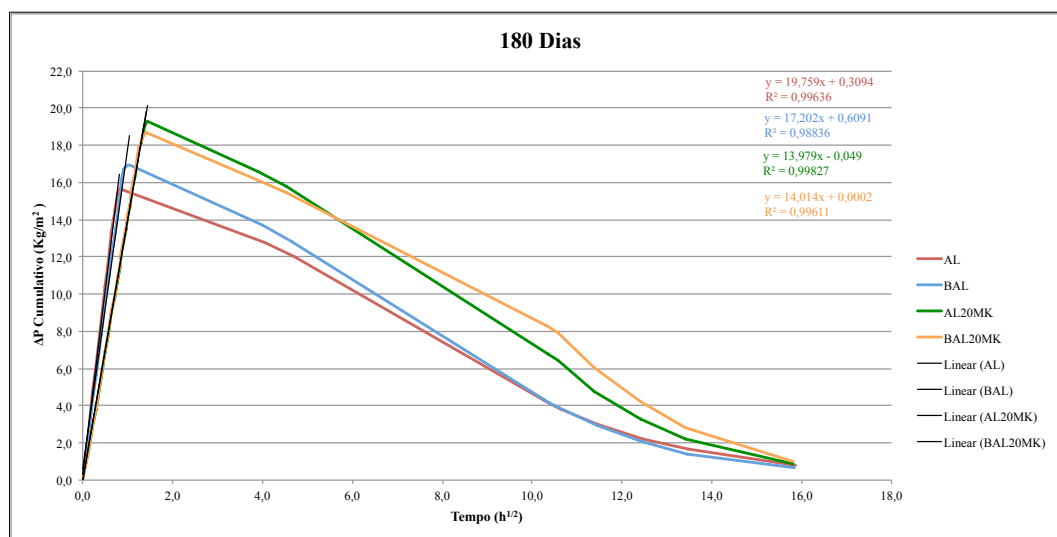


Figura 6.39 - Comportamento capilar (absorção e secagem) aos 180 dias.



Tabela 6.11 - Coeficientes de capilaridade dos provetes de argamassa.

Tempo de Cura	Argamassa	Coeficiente de Capilaridade ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ )
<b>28 Dias</b>	AL	13,047
	BAL	12,725
	AL20MK	16,019
	BAL20MK	15,843
<b>90 Dias</b>	AL	13,748
	BAL	13,351
	AL20MK	20,756
	BAL20MK	21,610
<b>180 Dias</b>	AL	19,759
	BAL	17,202
	AL20MK	13,979
	BAL20MK	14,014

Verifica-se que as argamassas com areia de rio, não apresentam um comportamento linear ao longo do tempo, visto que, as argamassas sem metacaulino são as que apresentam coeficientes de capilaridade mais baixos nos primeiros 90 dias de cura, quando comparadas com as que incorporam este aditivo. No entanto, aos 180 dias de cura, a argamassa AL20MK é a que apresenta um coeficiente mais baixo, seguida da argamassa BAL20MK.

Também para os primeiros 90 dias de cura, a argamassa que contém bentonite, BAL, é a que apresenta uma secagem mais rápida. O mesmo não se verifica aos 180 dias de cura, onde, apesar de próximos, a argamassa AL apresenta um tempo de secagem mais rápido.

## 6.8 ABSORÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO

### 6.8.1 Blocos de Adobe

O estudo do comportamento relativo à absorção de água, das argamassas, ao traço 1:3 de volume, em blocos de adobe, foi feito através da utilização de tubos Karsten.

Tabela 6.12 - Resultado do ensaio de absorção de água sob pressão aos diferentes dias de cura, para uma camada de argamassa (2cm).

Tempo de Cura	Coluna de água	Tempo de absorção (s)			
		AL	BAL	AL20MK	BAL20MK
30 Dias	1 mL	5	5	12	14
	2 mL	14	13	35	38
	3 mL	26	24	70	76
	4 mL	42	40	122	129
60 Dias	1 mL	5	2	10	11
	2 mL	11	5	29	32
	3 mL	20	10	60	64
	4 mL	32	17	105	112
90 Dias	1 mL	4	8	9	11
	2 mL	9	18	24	31
	3 mL	15	34	50	60
	4 mL	24	55	85	109

Tabela 6.13 - Resultado do ensaio de absorção de água sob pressão aos diferentes dias de cura, para duas camadas de argamassa (4cm).

Tempo de Cura	Coluna de água	Tempo de absorção (s)			
		AL	BAL	AL20MK	BAL20MK
30 Dias	1 mL	5	11	17	15
	2 mL	12	32	53	46
	3 mL	22	63	125	88
	4 mL	37	104	222	135
60 Dias	1 mL	2	4	19	17
	2 mL	5	11	60	47
	3 mL	10	22	130	88
	4 mL	17	41	210	138
90 Dias	1 mL	4	15	19	23
	2 mL	8	38	54	58
	3 mL	14	68	117	105
	4 mL	22	108	205	158

Tabela 6.14 - Resultado do ensaio de absorção de água sob pressão aos diferentes dias de cura, para uma camada de argamassa mais chapisco.

Tempo de Cura	Coluna de água	Tempo de absorção (s)			
		AL	BAL	AL20MK	BAL20MK
30 Dias	1 mL	6	12	19	29
	2 mL	16	29	50	100
	3 mL	32	50	96	203
	4 mL	53	77	162	325
60 Dias	1 mL	4	5	8	14
	2 mL	11	13	24	48
	3 mL	20	26	48	105
	4 mL	35	45	85	180
90 Dias	1 mL	5	11	15	30
	2 mL	12	28	47	77
	3 mL	22	51	100	142
	4 mL	34	82	180	222

Através da análise das tabelas anteriores, que representam o tempo de absorção para os diferentes tipos de camada ao longo do tempo, pode-se verificar que a incorporação de metacaulino e bentonite na argamassa (BAL20MK) melhora o seu comportamento de absorção, sendo esta a argamassa que apresenta maior tempo de absorção de água nas diferentes idades de cura. No entanto, quando a argamassa é aplicada em duas camadas (2x2 cm), este comportamento não se verifica, sendo a argamassa AL20MK a que apresenta maior tempo de absorção de água.

Quando comparados com os resultados obtidos para provetes de argamassa, pode-se verificar que estes resultados são bastante diferentes, sendo influenciados pelo tipo de suporte (bloco de adobe) onde estas argamassas são aplicadas, devido à sua elevada porosidade.

## 6.8.2 Parede de Adobe

### 6.8.2.1 Argamassas ao traço volumétrico 1:3

Tabela 6.15 - Resultado do ensaio de absorção de água sob pressão aos diferentes dias de cura.

Tempo de Cura	Coluna de água	Tempo de absorção (s)			
		AL	BAL	AL20MK	BAL20MK
30 Dias	1 mL	5	5	10	12
	2 mL	19	13	27	33
	3 mL	40	25	58	67
	4 mL	73	44	102	115
60 Dias	1 mL	11	5	34	13
	2 mL	25	12	77	34
	3 mL	43	22	140	62
	4 mL	64	36	223	100
90 Dias	1 mL	5	8	42	12
	2 mL	12	18	105	27
	3 mL	20	32	193	49
	4 mL	32	48	268	76

Segundo a Tabela 6.15, onde se encontram os resultados obtidos no ensaio de absorção de água sob pressão para as argamassas na parede de adobe, pode-se verificar que estes não assumem um comportamento linear, sendo que a argamassa BAL20MK é a que apresenta uma absorção de água mais lenta aos 30 dias de cura, no entanto, para as idades seguintes isso não se verifica, sendo a argamassa AL20MK a que assume melhor comportamento. Estes resultados foram, possivelmente, influenciados pelo ambiente laboratorial, não controlado, onde se encontra a parede de adobe.

### 6.8.2.2 Argamassas ao traço volumétrico 1:2

Tabela 6.16 - Resultado do ensaio de absorção de água sob pressão aos diferentes dias de cura.

Tempo de Cura	Coluna de água	Tempo de absorção (s)			
		AL	BAL	AL20MK	BAL20MK
30 Dias	1 mL	55	103	90	80
	2 mL	135	192	248	194
	3 mL	227	320	489	330
	4 mL	333	469	810	469
60 Dias	1 mL	59	60	531	42
	2 mL	150	142	1680	110
	3 mL	264	221	2192	193
	4 mL	390	318	3300	293
90 Dias	1 mL	63	36	176	52
	2 mL	158	88	507	135
	3 mL	271	157	915	231
	4 mL	405	234	1365	350

Para as argamassas, com traço 1:2 de volume, verifica-se que a argamassa que contém metacaulino, AL20MK, é a que apresenta os maiores valores de tempo de absorção de água sob pressão, logo, a que absorve água mais lentamente em todas as idades de cura.

Mais uma vez, é de realçar que as condições de cura, não controladas, onde se encontra a parede de adobe, bem como a porosidade deste suporte, influenciam os resultados obtidos.

## 6.9 ENSAIO DE ADERÊNCIA (PULL-OFF)

### 6.9.1 Considerações Gerais

Os resultados seguintes representam a força de adesão obtida com o aparelho pull-off para as argamassas em blocos de adobe e parede de adobe, aos 30, 60 e 90 dias de cura.

## 6.9.2 Blocos de Adobe

### 6.9.2.1 Argamassas ao traço volumétrico 1:3

Tabela 6.17 - Resultados do ensaio de aderência para as argamassas em blocos de adobe aos diferentes dias de cura.

Tempo de Cura	Amostra	Tipo de camada	Força de Adesão (N/mm <sup>2</sup> )	Tipo de Rotura
30 Dias	AL	2 camadas	0,024	coesiva
		1 camada	0,023	coesiva
		2 camadas (ch)	0,004	coesiva
	BAL	2 camadas	0,003	coesiva
		1 camada	0,023	coesiva
		2 camadas (ch)	0,004	coesiva
	AL20MK	2 camadas	0,013	adesiva
		1 camada	0,088	coesiva
		2 camadas (ch)	0,075	coesiva
	BAL20MK	2 camadas	0,046	adesiva
		1 camada	0,127	coesiva
		2 camadas (ch)	0,056	coesiva
60 Dias	AL	2 camadas	0,027	coesiva
		1 camada	0,039	coesiva
		2 camadas (ch)	0,018	coesiva
	BAL	2 camadas	0,003	coesiva
		1 camada	0,009	coesiva
		2 camadas (ch)	0,003	coesiva
	AL20MK	2 camadas	0,026	adesiva
		1 camada	0,098	coesiva
		2 camadas (ch)	0,021	coesiva
	BAL20MK	2 camadas	0,072	adesiva
		1 camada	0,075	coesiva
		2 camadas (ch)	0,089	coesiva
90 Dias	AL	2 camadas	0,004	coesiva
		1 camada	0,022	maioritariamente adesiva
		2 camadas (ch)	0,010	coesiva
	BAL	2 camadas	0,003	coesiva
		1 camada	0,019	coesiva
		2 camadas (ch)	0,002	coesiva
	AL20MK	2 camadas	0,017	coesiva
		1 camada	0,044	coesiva
		2 camadas (ch)	0,029	coesiva
	BAL20MK	2 camadas	0,052	adesiva
		1 camada	0,106	coesiva
		2 camadas (ch)	0,003	coesiva

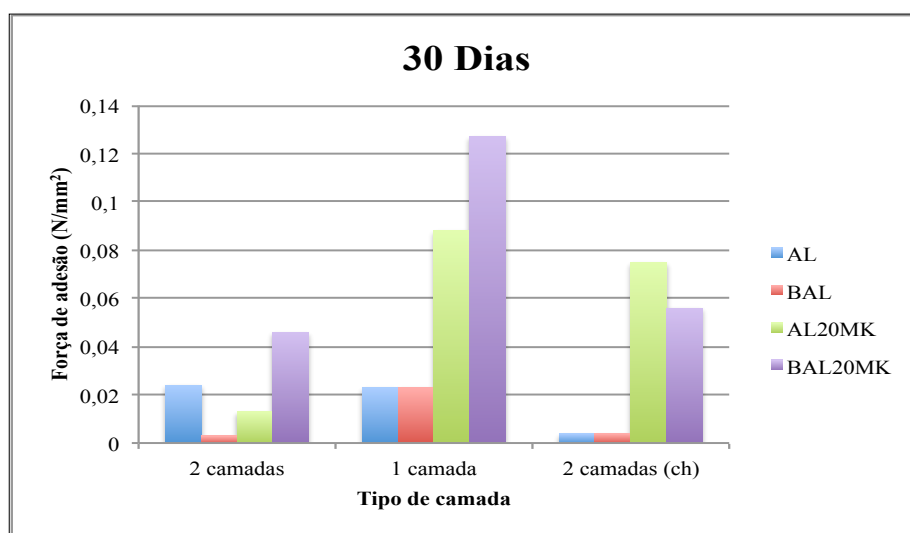


Figura 6.40 - Comparação gráfica dos valores da força de adesão para as diferentes camadas e tipos de argamassa aos 30 dias de cura.

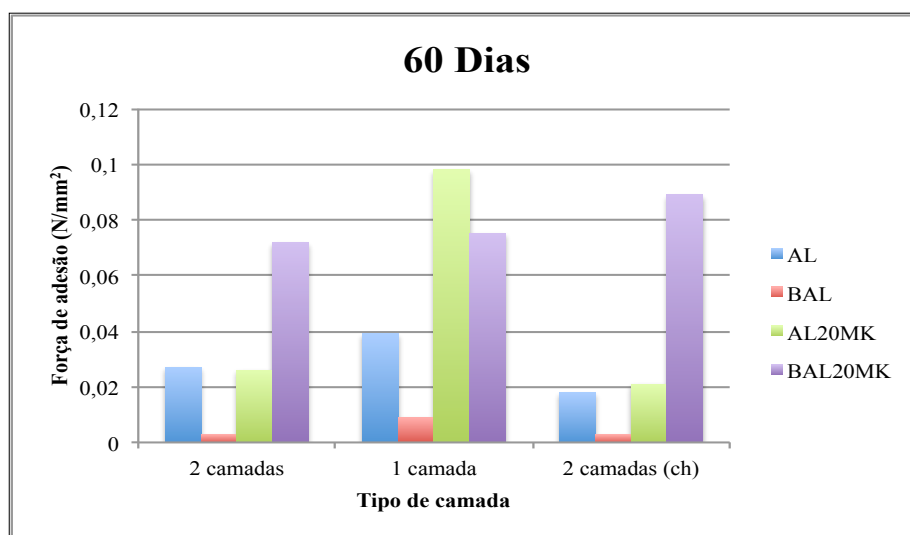


Figura 6.41 - Comparação gráfica dos valores da força de adesão para as diferentes camadas e tipos de argamassa aos 60 dias de cura.

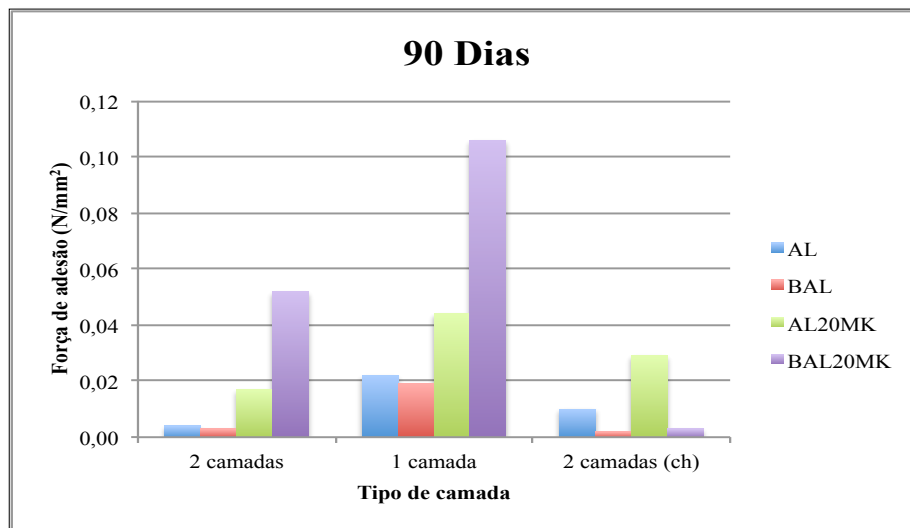


Figura 6.42 - Comparação gráfica dos valores da força de adesão para as diferentes camadas e tipos de argamassa aos 90 dias de cura.

Foram registados dois tipos de rotura neste ensaio: adesiva e coesiva. Sendo que apenas as roturas do tipo coesivo se podem considerar, pois transmitem o valor real da força de adesão da argamassa, superior ao lido no pull-off. Ao contrário das roturas do tipo adesivo que sugerem que o valor da força de adesão das argamassas é igual ao valor lido no pull-off, não sendo, por isso, conclusivos [25].

Pela análise feita aos resultados da força de adesão obtida para cada tipo de camada e de argamassa, verifica-se que estes valores não são uniformes ao longo do tempo. No entanto, as argamassas que contêm metacaulino e bentonite (AL20MK e BAL20MK) apresentam maiores valores de força de adesão (Tabela 6.17, Figura 6.40, Figura 6.41 e Figura 6.42).

De referir também que, as argamassas, quando colocadas em duas camadas, diminuem a capacidade de adesão.



### 6.9.3 Parede de Adobe

#### 6.9.3.1 Argamassas ao traço volumétrico 1:3

Tabela 6.18 - Resultados do ensaio de aderência para as argamassas na parede de adobe aos diferentes dias de cura.

Tempo de Cura	Amostra	Força de Adesão (N/mm <sup>2</sup> )	Tipo de Rotura
30 Dias	AL	0,018	coesiva
	BAL	0,024	coesiva
	AL20MK	0,049	coesiva
	BAL20MK	0,104	adesiva
60 Dias	AL	0,055	coesiva
	BAL	0,055	coesiva
	AL20MK	0,067	maioritariamente adesiva
	BAL20MK	0,061	adesiva
90 Dias	AL	0,055	maioritariamente adesiva
	BAL	0,055	maioritariamente coesiva
	AL20MK	0,071	adesiva
	BAL20MK	0,043	adesiva

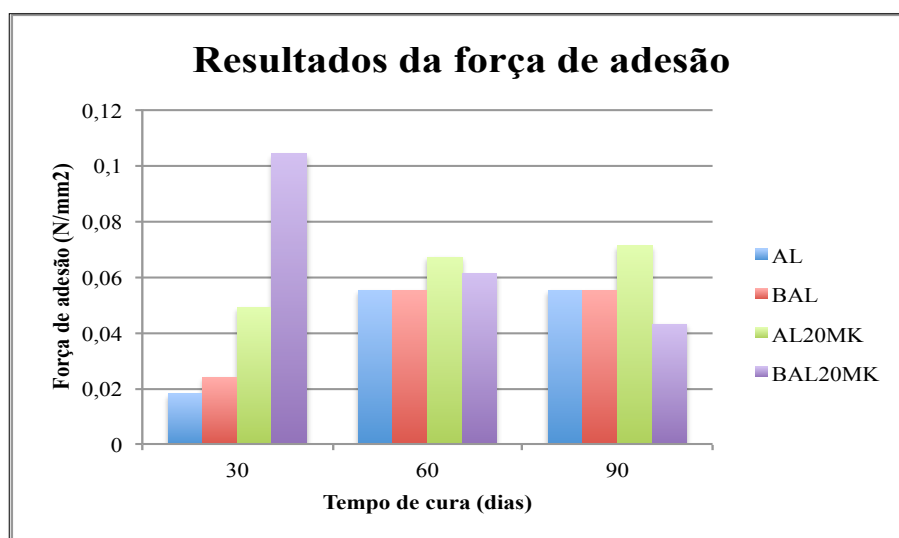


Figura 6.43 - Comparação gráfica dos valores da força de adesão para os diferentes tipos de argamassa ao traço 1:3 de volume ao longo do tempo.

### 6.9.3.2 Argamassas ao traço volumétrico 1:2

Tabela 6.19 - Resultados do ensaio de aderência para as argamassas na parede de adobe aos diferentes dias de cura.

Tempo de Cura	Amostra	Força de Adesão (N/mm <sup>2</sup> )	Tipo de Rotura
30 Dias	AL	0,010	coesiva
	BAL	0,031	adesiva
	AL20MK	0,055	coesiva
	BAL20MK	0,171	adesiva
60 Dias	AL	0,001	coesiva
	BAL	0,055	adesiva
	AL20MK	0,037	adesiva
	BAL20MK	0,055	adesiva
90 Dias	AL	0,055	coesiva
	BAL	0,055	adesiva
	AL20MK	0,055	coesiva
	BAL20MK	0,055	adesiva

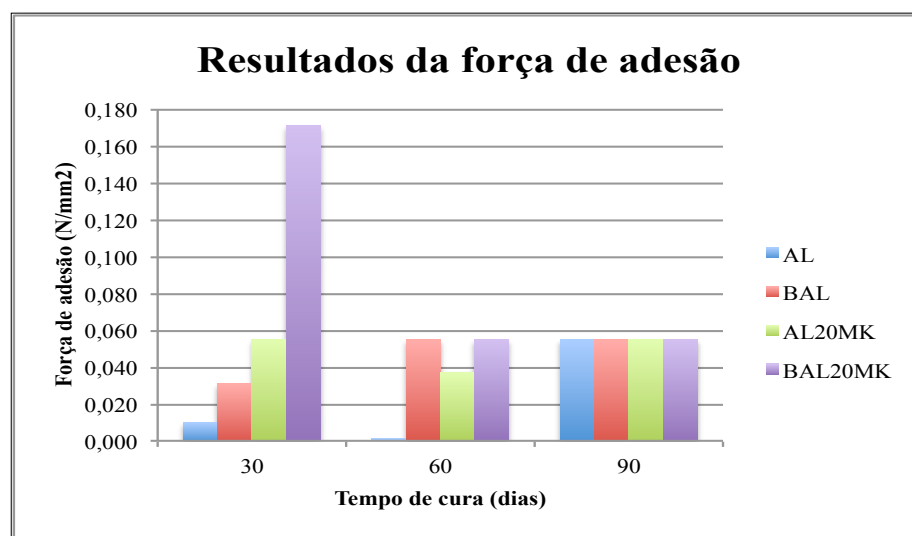


Figura 6.44 - Comparação gráfica dos valores da força de adesão para os diferentes tipos de argamassa ao traço 1:2 de volume ao longo do tempo.

Também para o ensaio de aderência com o pull-off feito às argamassas na parede de adobe, verifica-se que ocorreram dois tipos de rotura: coesiva e adesiva.

Através da observação gráfica dos resultados da força de adesão para as argamassas ao traço 1:3 e ao traço 1:2 de volume, pode-se verificar que a argamassa BAL20MK apresenta um valor de força de adesão, aos 30 dias de cura, bastante superior ao das argamassas restantes, no entanto, a rotura adesiva que ocorreu para este valor de força de adesão não permite qualquer conclusão.

Para as argamassas ao traço volumétrico 1:3, verifica-se que a argamassa BAL apresenta um aumento da sua força de adesão ao longo do tempo e roturas do tipo coesivo, o que significa que esta argamassa apresenta uma força de adesão com valor superior ao registado no pull-off.

Quando comparadas com as argamassas (uma camada) em blocos de adobe, estas apresentam menores valores de força de adesão, o que pode estar relacionado com o ambiente de cura, não controlado, no qual a parede de adobe está inserida.

## 6.10 AVALIAÇÃO DA COMPACIDADE UTILIZANDO O PUNDIT

### 6.10.1 Considerações Gerais

Neste subcapítulo as argamassas na parede de adobe foram submetidas ao ensaio com o PUNDIT aos 30 e 60 dias de cura. Devido a questões técnicas não foi possível realizar este ensaio aos 90 dias de cura.

### 6.10.2 Argamassas ao Traço Volumétrico 1:3

Tabela 6.20 - Resultados do ensaio com PUNDIT aos diferentes dias de cura.

Tempo de Cura	Amostra	Distância entre células	Velocidade de propagação (km/s)
30 Dias	AL	10 cm	1,56
	BAL		1,67
	AL20MK		2,35
	BAL20MK		2,19
60 Dias	AL	10 cm	1,00
	BAL		0,91
	AL20MK		1,94
	BAL20MK		2,18

Para este tipo de argamassas, e através da observação da Tabela 6.20, verifica-se que com o aumento da idade de cura, existe uma diminuição da velocidade de propagação das ondas emitidas pelo PUNDIT, este facto pode ser explicado pela existência de microfissuras nas amostras de argamassa.

A argamassa BAL20MK é a que apresenta menor redução de velocidade ao longo do tempo e também, é a que apresenta maior velocidade de propagação, sendo por isso, a argamassa com melhor compactação.

### 6.10.3 Argamassas ao Traço Volumétrico 1:2

Tabela 6.21 - Resultados do ensaio com PUNDIT aos diferentes dias de cura.

<b>Tempo de Cura</b>	<b>Amostra</b>	<b>Distância entre células</b>	<b>Velocidade de propagação (km/s)</b>
<b>30 Dias</b>	<b>AL</b>	<b>10 cm</b>	1,81
	<b>BAL</b>		1,39
	<b>AL20MK</b>		2,94
	<b>BAL20MK</b>		1,44
<b>60 Dias</b>	<b>AL</b>	<b>10 cm</b>	0,89
	<b>BAL</b>		1,00
	<b>AL20MK</b>		1,66
	<b>BAL20MK</b>		2,35

Também para as argamassas ao traço 1:2 de volume, se verificou uma diminuição da velocidade de propagação das ondas emitidas pelo PUNDIT ao longo do tempo, exceto para a argamassa BAL20MK que apresenta um aumento desta velocidade.

Para os dois rácios de argamassa, pode-se afirmar que a argamassa BAL20MK é a que apresenta melhores resultados, sendo por isto a argamassa com melhor compactação. Os resultados para as restantes argamassas são pouco conclusivos, visto que podem ter sofrido influência pelo ambiente de cura, não controlado, e também pela existência de microfissuração.

## **6.11 ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL ACELERADO**

### **6.11.1 Considerações Gerais**

O ensaio de envelhecimento artificial acelerado por imposição de ciclos “seco-molhado” teve a duração de 12 semanas, decorrendo de 18 de Fevereiro a 9 de Maio de 2013. Os adobes foram sujeitos a 42 ciclos “seco-molhado” durante este período.

### **6.11.2 Argamassas ao Traço Volumétrico 1:3**

De acordo com os resultados gráficos, em anexo, do ensaio de gravimetria realizado aos blocos de adobe pode-se verificar que as oscilações de peso verificadas variam entre +2% e +5%. Isto deve-se ao facto da decomposição do bloco de adobe onde foram aplicadas as argamassas. A maior oscilação de peso ocorre ao fim da primeira semana, isto porque o bloco de adobe contém humidade devido às condições a que foi submetido na câmara climática de ensaios. Para evitar esta situação dever-se-ia ter colocado o adobe numa estufa, antes de este ser pesado, para que a sua massa estabilizasse ao fim de cada semana de ciclos, para que fosse possível comparar os valores obtidos com o seu peso inicial.

No entanto, pode-se considerar que, exceto a primeira semana, as condições nas quais os adobes foram pesados foram sempre iguais e portanto, é possível comparar esses valores.

As oscilações de peso mais acentuadas (Figura A.5) verificam-se para a argamassa AL20MK (duas camadas), tendo estes valores uma maior discrepância a partir da sexta semana de ciclos. Registou-se o início de degradação superficial desta amostra de argamassa (Figura 6.45).

As argamassas AL, BAL e BAL20MK não sofreram qualquer tipo de alteração visual, bem como AL20MK quando colocada numa camada, sendo as suas oscilações de peso pouco significativas.



Figura 6.45 - Degradação superficial observada na argamassa AL20MK com duas camadas.

# ***CAPÍTULO 7***

---

## ***Conclusões***





## 7 CONCLUSÕES

A presente dissertação de mestrado teve como principal objetivo estudar argamassas de cal com diferentes composições em suportes de adobe, com o fim de perceber, com melhor clareza, a sua aplicação na área da reabilitação e conservação do edificado. Para tal, foram efetuados ensaios laboratoriais, nomeadamente, ensaios mecânicos e químicos, com o intuito de se perceber qual a argamassa que se melhor adequa aos suportes em adobe.

Devido à elevada porosidade do adobe, é necessário ter em atenção o comportamento na presença de água das diferentes argamassas de revestimento. Estas devem ter uma absorção de água lenta e um tempo de secagem rápido, de modo a minimizar a infiltração de água nas zonas não fendilhadas do suporte.

Relativamente aos provetes de argamassa, após a análise dos resultados obtidos para o ensaio de absorção de água por capilaridade pode-se concluir que, no geral, a bentonite melhora o comportamento na presença de água das argamassas, sendo BAL a que apresenta melhores resultados ao longo de tempo. No entanto, a par com a argamassa BAL, a argamassa de cal, AL, também apresenta lenta absorção de água e rápida secagem, sendo por isto, estes dois tipos de argamassas as que apresentam os resultados mais próximos do pretendido.

Quanto ao comportamento capilar das argamassas aplicadas em blocos de adobe, observou-se que as argamassas com maior tempo de absorção são as que contêm metacaulino na sua composição, AL20MK e BAL20MK. Sendo que, quando aplicadas numa camada, a bentonite melhora este comportamento.

Quando aplicadas na parede de adobe, em ambiente de cura não controlado e por isso, mais próximo da realidade, as argamassas que apresentam tempo de absorção de água mais lento são, também as que contêm metacaulino. No entanto, para este tipo de suporte, a argamassa AL20MK, com traço volumétrico 1:2, foi a que mais se destacou.

Segundo a análise feita às propriedades mecânicas das diferentes argamassas, as que são compostas com areia de rio apresentaram, no geral, resultados mais elevados de resistência à flexão e à compressão, sendo as que contêm metacaulino as que mais se evidenciaram. Relativamente ao ensaio realizado para avaliar o comportamento mecânico

das argamassas em ambiente salino, conclui-se que, de modo geral, todas as argamassas aumentam a sua resistência à flexão, no entanto, a incorporação de 5% de bentonite na argamassa (BAL) melhora de forma clara a sua resistência, quando comparada com as restantes. Os valores de resistência à compressão, ainda que de forma pouco evidente, foram inferiores ao obtidos para as argamassas que não sofreram ataque salino.

Verificou-se que, as argamassas AL20MK e BAL20MK foram as que obtiveram melhores resultados de aderência quando aplicadas em blocos de adobe, já na parede de adobe, estes valores diminuíram. Pode-se ainda concluir que, a argamassa que contém metacaulino e bentonite na sua composição é a mais compacta, e que todas as outras argamassas apresentam microfissuras na sua estrutura, sendo que, estas podem levar ao aparecimento de patologias.

Na argamassa AL20MK observou-se alguma degradação superficial, quando sujeita a envelhecimento acelerado.

Assim, considera-se que as argamassas AL20MK e BAL20MK, são as que no geral, apresentam melhores resultados, maior durabilidade e comportamento à presença de água, quando aplicadas em condições análogas à realidade. Embora a argamassa BAL seja aquela que obteve melhor desempenho relativamente à absorção de água por capilaridade, e em ambiente salino.

A seleção do tipo de argamassa para a utilização em intervenções de reabilitação em edifícios de adobe deve ser estudada de acordo com as condições do edifício em causa, tendo em conta a natureza e o estado do suporte e o clima local.

Futuramente, seria interessante avaliar de forma mais detalhada as argamassas ao traço 1:2 de volume, nomeadamente, analisando o seu comportamento quando colocadas em suporte de adobe e sujeitas a um envelhecimento artificial acelerado e, também, o seu comportamento em ambiente salino. O uso de outro tipo de metacaulino, como por exemplo, metacaulino a partir de caulino nacional. E também a substituição da bentonite por outro tipo de aditivo, como a vermiculite.

***REFERÊNCIAS  
BIBLIOGRÁFICAS***

---



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Loureiro, A. ; Viçoso, P. (2007). *Desenvolvimento de argamassas para edifícios em adobe*. Universidade de Aveiro.
- [2] Miguel, P. R. E. (2008). *Desenvolvimento de argamassas de reabilitação de edifícios em adobe*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- [3] Velosa, A. ; Veiga, R. (2008). *Lime-metakaolin mortars - properties and applications*. em *SB07 Portugal: Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millenium*. Rotterdam (Netherlands): in-house publishing.
- [4] Velosa, A. L. ; Veiga, M. R. (2001). *The use of pozzolans as additives in lime mortars for employment in building rehabilitation*. em *Proc. Int. Congr. on Historical Constructions*. Guimarães.
- [5] Association, Mortar Industry. *The Use of Lime in Mortar*. Consultado a 23/11/2012, Disponível em: [http://www.britishlime.org/technical/lime\\_in\\_mortars.php](http://www.britishlime.org/technical/lime_in_mortars.php).
- [6] *Ciclo da cal*. Consultado a 23/11/2012, Disponível em: <http://www.grupodb.com.br/site/cal.php>.
- [7] Coutinho, A. S. (1997), *Fabrico e Propriedades do Betão*. Vol. I, Lisboa: LNEC.
- [8] Siddique, R. ; Klaus, J. (2009), *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review*. *Applied Clay Science*, **43**(3–4): p. 392-400.
- [9] Velosa, Ana ; Veiga, Maria Rosário *Lime-metakaolin mortars - properties and applications*.
- [10] Ahmad, S.; Barbhuiya, S. A.; Elahi, A. ; Iqbal, J. (2011), *Effect of Pakistani Bentonite on Properties of Mortar and Concrete*. *Clay Minerals*, **46**: p. 85-92.

- [11] Eisenhour, D. D. ; Brown, R. K. (2009), *Bentonite and Its Impact on Modern Life. Elements*, 5: p. 83-88.
- [12] Lourenço, P. (2002), *Arquitectura de Terra: uma visão de futuro*, ed. <http://www.planetaCAD.com>: Companhia de Arquitectura e Design.
- [13] Varum, H.; Costa, A.; Pereira, H.; Almeida, J. ; Rodrigues, H. (2008), *Caracterização do Comportamento Estrutural de Paredes de Alvenaria de Adobe*. *Mecânica Experimental*, **15**: p. 23 - 32.
- [14] Varum, H.; Costa, A.; Velosa, A.; Martins, T.; Pereira, H. ; Almeida, J. (2006), *Caracterização Mecânica e Patológica das Construções em Adobe no Distrito de Aveiro como Suporte em Intervenções de Reabilitação*. *Houses and Cities Built with Earth: Conservation, Significance and Urban Quality*: p. 41-45.
- [15] *Casas de adobe*. Consultado a 18/11/2012, Disponível em: <http://www.tripmondo.com/mexico/morelos/hueyapan/picture-gallery-of-hueyapan/>.
- [16] Magalhães, A.; Veiga, M. ; Costa, D. (2005). *Caracterização do estado de conservação de revestimentos de paredes antigas através de ensaios "in situ". Dois casos de estudo*. em VI Seminário Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (VI SBTA), I International Symposium on Mortars Technology. Florianópolis, Brasil.
- [17] Teutonico, J. M. (1988), *A laboratory manual for architectural conservators*, ICCROM: Rome.
- [18] CEN, Comité Europeu de Normalização (2002), *EN 1015-18: Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*: Bruxelas, Bélgica.
- [19] Galvão, J. M. P. (2009). *Técnicas de ensaio in-situ para avaliação do comportamento mecânico de rebocos em fachadas - Esclerómetros e ultra-sons*. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa.

- [20] Soares, A. A. O. (2011). *Análise das Características Mecânicas de Amostras Recolhidas em Fachadas Rebocadas*. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa.
- [21] *Ensaio Pull Off*. Consultado a 22/11/2012, Disponível em: [http://www.consultoriaeanalise.com/2010\\_08\\_01\\_archive.html](http://www.consultoriaeanalise.com/2010_08_01_archive.html).
- [22] CEN, Comité Europeu de Normalização (1998), *Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*: Bruxelas, Bélgica.
- [23] A. Gameiro, A. Santos Silva, R. Veiga, A. Velosa (2011). *Metakaolin-lime hydration products and phase stability: Microscopy analysis*. em 13th Euroseminar on microscopy, applied to building materials. Ljubljana, Slovenia.
- [24] Goñi, S. ; Guerrero, A. (2003), *Accelerated carbonation of Friedel's salt in calcium aluminate cement paste*. Cement and Concrete Research, **33**: p. 21-26.
- [25] CEN, Comité Europeu de Normalização (2000), *EN 1015-12: Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*: Bruxelas, Bélgica.





***ANEXOS***

---



## ANEXOS

Análise gráfica do ensaio de gravimetria, feito aos blocos de adobe sujeitos ao ensaio de envelhecimento artificial acelerado, durante 12 semanas.

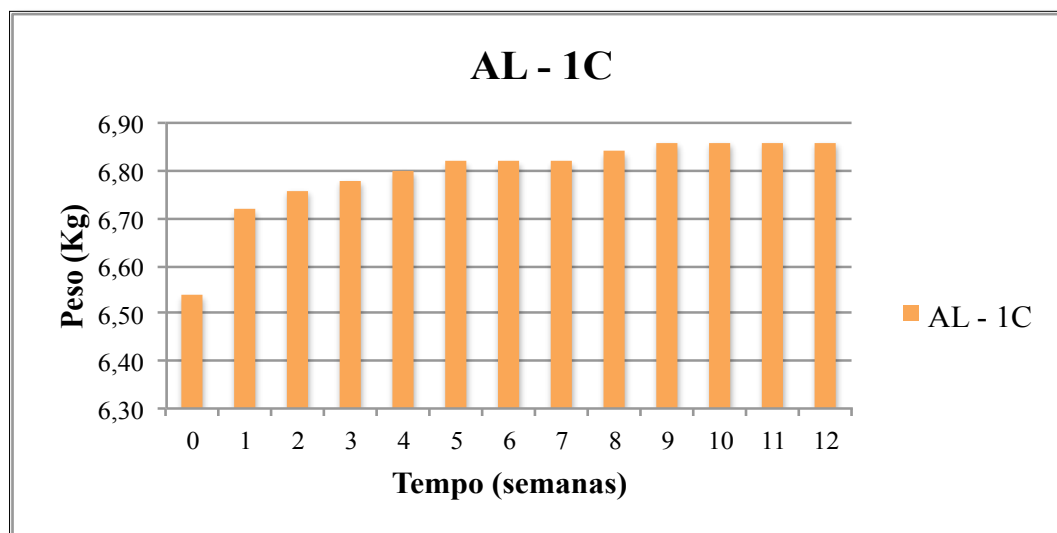


Figura A.1 - Análise gravimétrica da argamassa AL em bloco de adobe com uma camada.

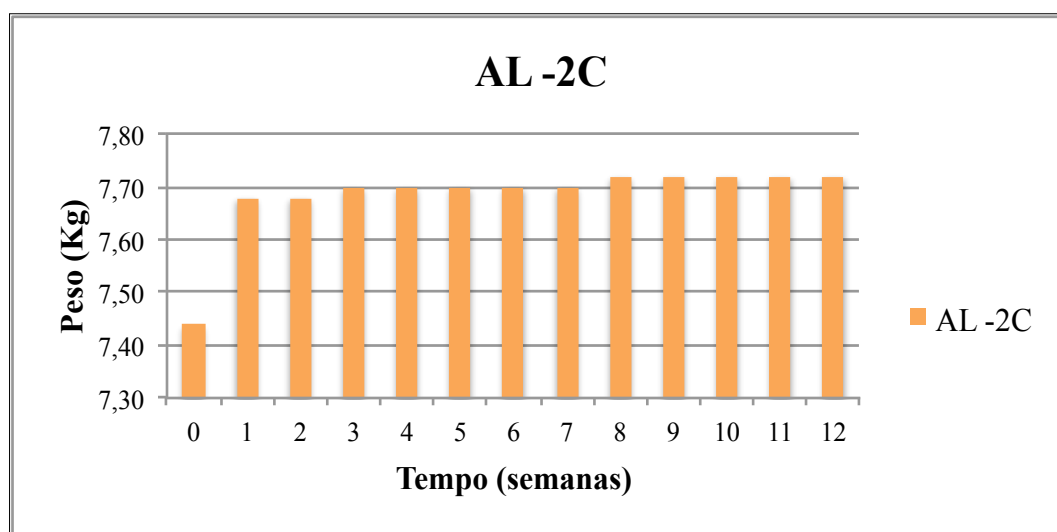


Figura A.2 - Análise gravimétrica da argamassa AL em bloco de adobe com duas camadas.

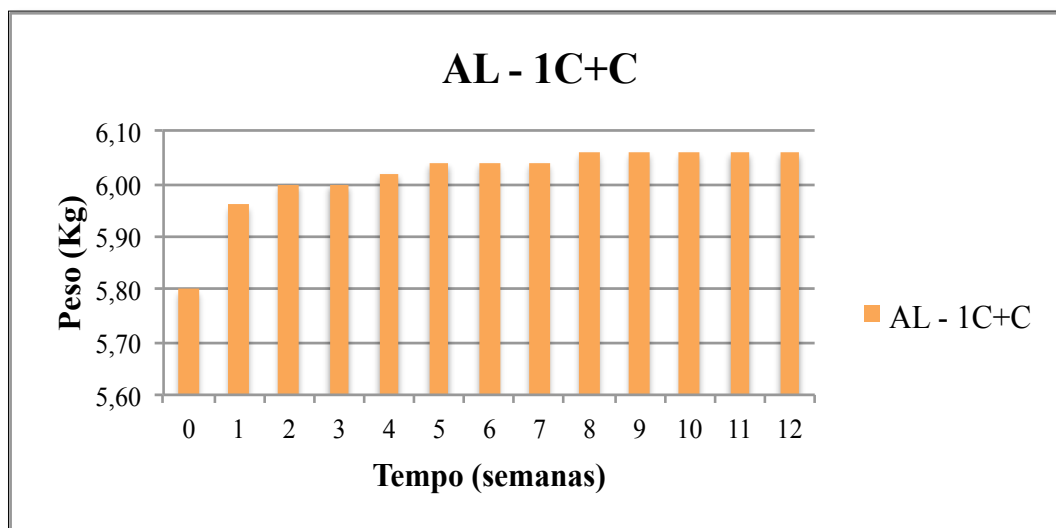


Figura A.3 - Análise gravimétrica da argamassa AL em bloco de adobe com duas camadas, sendo que a primeira é de chapisco.

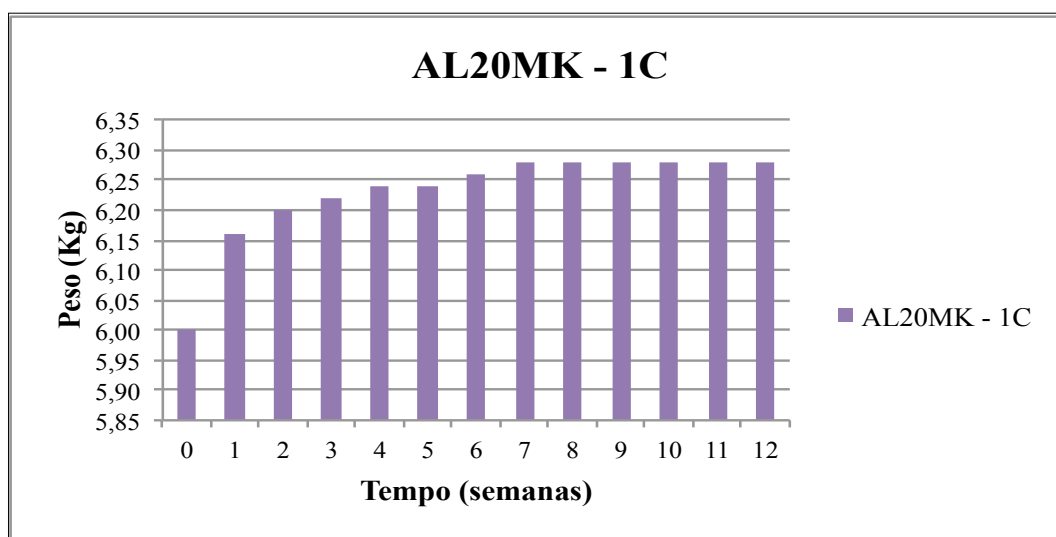


Figura A.4 - Análise gravimétrica da argamassa AL20MK em bloco de adobe com uma camada.

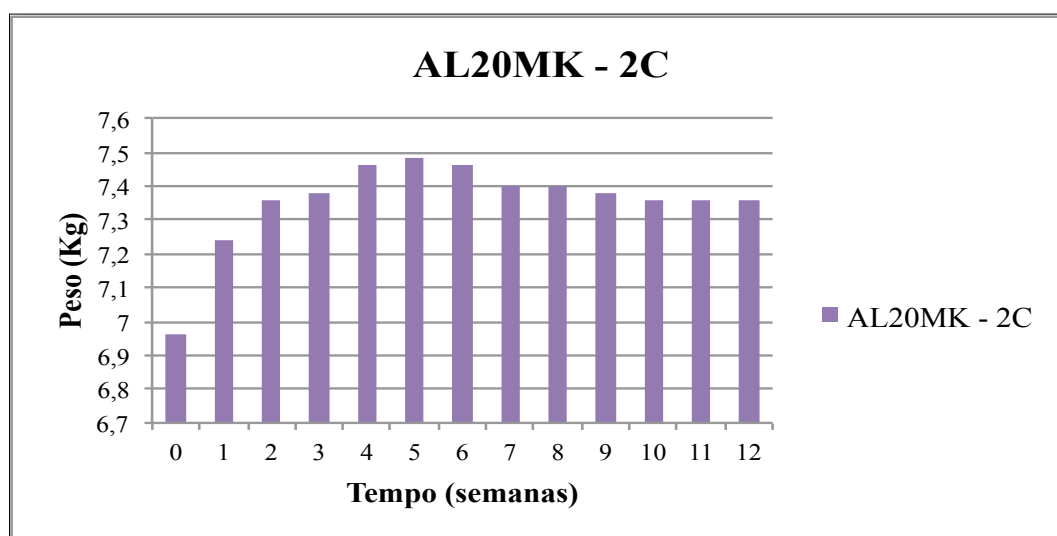


Figura A.5 - Análise gravimétrica da argamassa AL20MK em bloco de adobe com duas camadas.

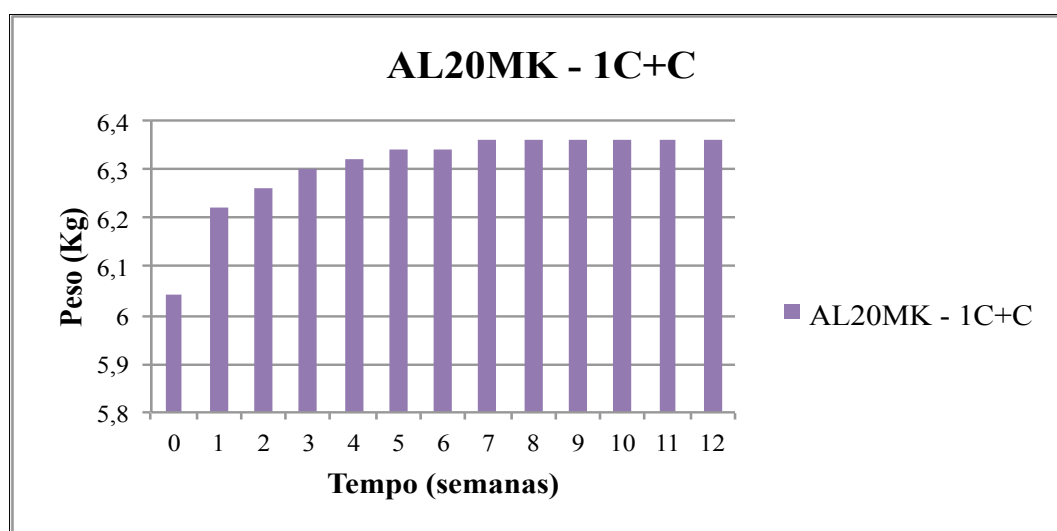


Figura A.6 - Análise gravimétrica da argamassa AL20MK em bloco de adobe com duas camadas, sendo que a primeira é de chapisco.

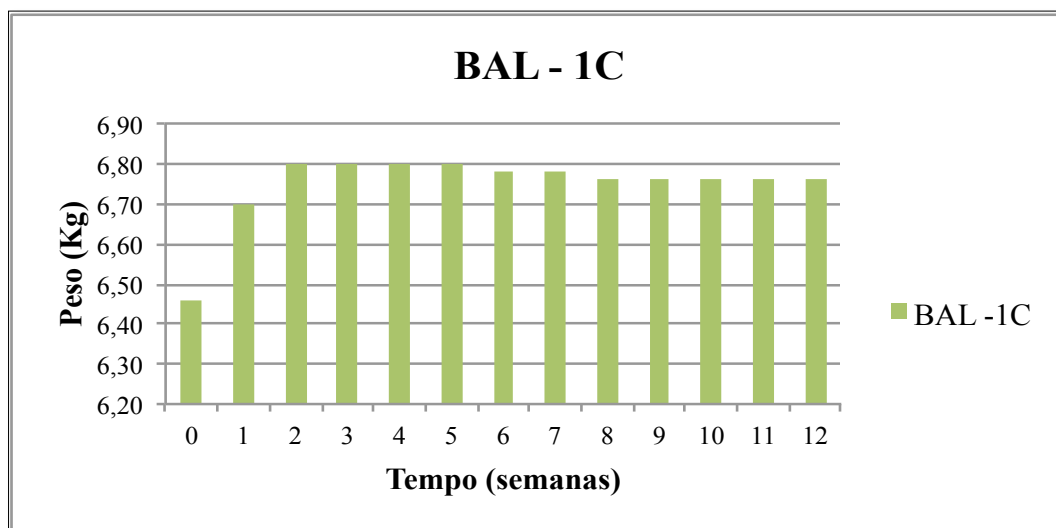


Figura A.7 - Análise gravimétrica da argamassa BAL em bloco de adobe com uma camada.

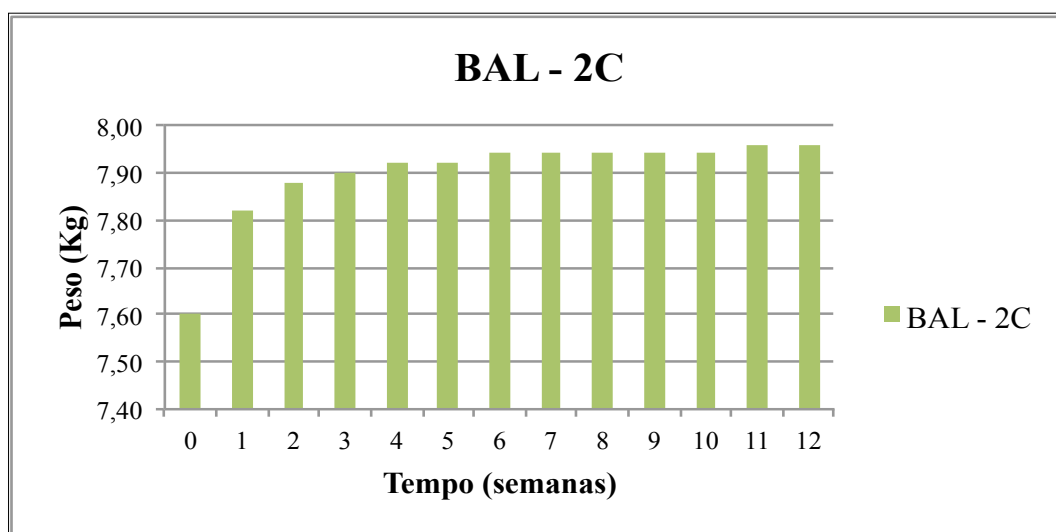


Figura A.8 - Análise gravimétrica da argamassa BAL em bloco de adobe com duas camadas.

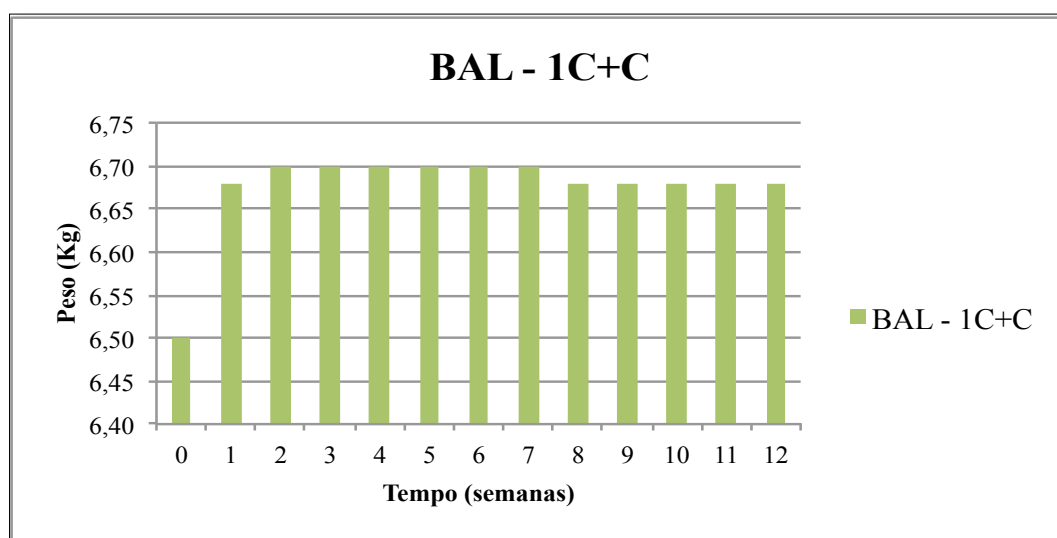


Figura A.9 - Análise gravimétrica da argamassa BAL em bloco de adobe com duas camadas, sendo que a primeira é de chapisco.

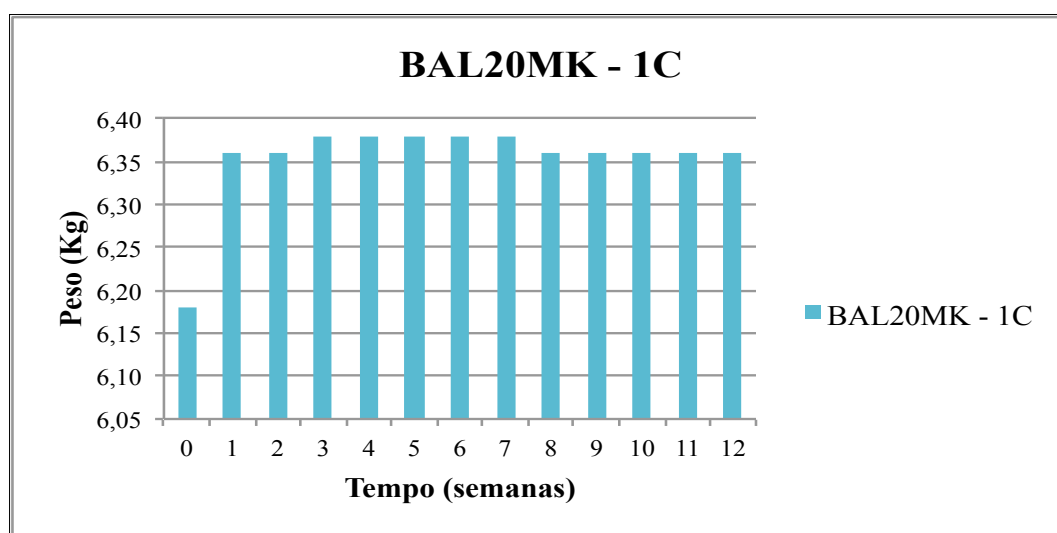


Figura A.10 - Análise gravimétrica da argamassa BAL20MK em bloco de adobe com uma camada.

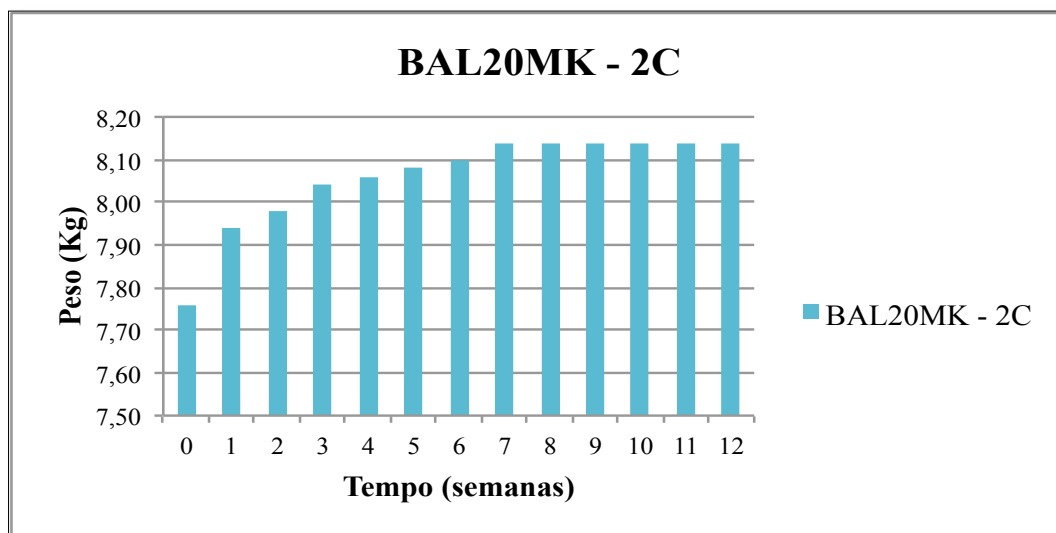


Figura A.11 - Análise gravimétrica da argamassa BAL20MK em bloco de adobe com duas camadas.

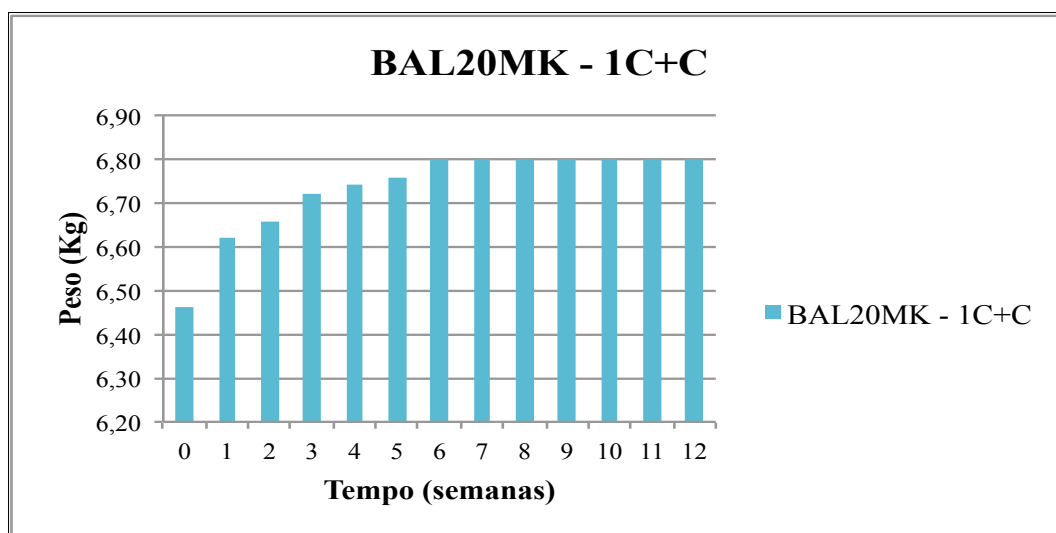


Figura A.12 - Análise gravimétrica da argamassa BAL20MK em bloco de adobe com duas camadas, sendo que a primeira é de chapisco.